На правах рукописи

ЗАЙЦЕВ ПЕТР СЕРГЕЕВИЧ

МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРЕДПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЭТАПОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОДУКЦИИ

Специальность 2.5.22 – Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

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

Научный руководитель: **Фролова Елена Александровна**
доктор технических наук, доцент,

Официальные оппоненты: **Шинкевич Алексей Иванович,**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Логистики и управления» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Щеглов Дмитрий Константинович,
кандидат технических наук, доцент, научный руководитель расчетно-исследовательского отдела Акционерного общества «Научно-производственное объединение «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз-Антей» - Обуховский завод»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3

Защита диссертации состоится «09» декабря 2025 г., в 16-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.384.02 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, лит. А. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета https://dissov.guap.ru/defense/zajcev_ps.

Автореферат разослан «22» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.384.02
Кандидат технических наук, доцент С.А. Назаревич

I.ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Производство радиоэлектроники является наукоёмкой и высокотехнологичной отраслью страны, для устойчивого и успешного развития которой необходимо отдавать приоритет вопросам оценки и повышения качества радиоэлектронных изделий, демонстрирующих устойчивую тенденцию к усложнению. Современная радиоэлектронная промышленность ориентирована на миниатюризацию компонентов и увеличение плотности их расположения на печатной плате (ПП), ввиду чего с каждым годом возрастают требования к технологическому процессу, подготовке производства, а также организации производственных процессов на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ). С другой стороны, глобальная практика демонстрирует усложнение логистических связей и нестабильную ценовую политику на отдельную номенклатуру, что также приводит к нестабильности в части состава изделий.

Возникает следующее противоречие: традиционные подходы к управлению стандартной номенклатурой радиоэлектронной компонентной базы при обеспечении качества предпроизводственных этапов жизненного цикла радиоэлектронной продукции (РЭП) не удовлетворяют возрастающим требованиям и темпам миниатюризации и увеличения плотности компоновки элементов, при высокой динамике и трансформации логистических связей.

Макроэкономическая турбулентность, предпосылки которой возникли еще в 2020 году, привела к высокоактивному изменению традиционных связей в системе «поставщик - производитель», утрата доступа к стандартной номенклатуре электронной компонентной базы (ЭКБ) сформировала практическую основу для решения важной научной задачи, имеющей значение для развития отечественной приборостроительной отрасли: повышение качества и результативности предпроизводственных процессов при выпуске серийной и опытной продукции в рамках динамично развивающейся ситуации на рынке ЭКБ для оперативной адаптации РЭП под доступную ЭКБ.

В рамках настоящего исследования предпроизводственный этап рассматривается как комплексная стадия ЖЦ продукции, содержательная часть которой реализуется через совокупность взаимосвязанных процессов.

Актуальность совершенствования предпроизводственных процессов жизненного цикла РЭП подтверждается необходимостью снижения трудозатрат кадрового состава и минимизации периода реагирования на изменение доступности материальных ресурсов при производстве. Актуальность темы подтверждается разработкой законодательной базы Российской Федерации, направленной на стимулирование развития отечественной электронной промышленности.

Степень научной разработанности темы. Проблемы автоматизации этапов DFM-анализа прорабатывались в работах Г.И. Коршунова, А.А. Дзюбаненко, С. Попова, R. Almeida, L. Po-Ting, C. Shuo-Yan, C. Lin-Lin, G. Douglas, D. Pham, S. Dimov, R. Gault. Проблемы формирования сквозной модели управления качеством на всех этапах ЖЦ рассматривались в работах: Г.И. Коршунова, Р.И. Сольницева, А. А. Дзюбаненко, Г.А. Есенкова, А.А. Демченко, А.В. Евченко, П.С. Серенков, В.Л. Соломахо, В.В. Краснопрошин.

Анализ трудов отечественных и зарубежных ученых показал, что в настоящее время не в полной мере исследованы вопросы оценки и обеспечения качества предпроизводственных процессов изготовления РЭП с точки зрения оперативного и достоверного анализа, имеющиеся математические модели и методики оценки качества зачастую носят теоретический характер по причине отсутствия повсеместного внедрения принципов «индустрии 4.0». Также методики корректировки конструкторской документации (КД) РЭП под доступную на рынке ЭКБ, в основном, контролируются встроенными пакетами DRC с последующим проведением непосредственно на заводах-изготовителях DFM-анализа, при котором по-прежнему сохраняется большой перечень операций, выполняемых вручную.

Актуальность диссертационного исследования соответствует таким критическим технологиям Российской Федерации, как «Базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники» (современная РЭП на 85-90% состоит из печатных узлов), «Базовые технологии силовой электротехники» (в работе представлены методы верификации ЭКБ для всех типов изделий, в том числе силовой электроники).

Целью работы является повышение результативности и обеспечение качества предпроизводственных процессов изготовления РЭП путем цифровизации трудноформализуемых и высокотехнологичных процессов жизненного цикла.

Основываясь на определенной выше цели, в работе были поставлены и решены следующие **научные задачи:**

1. Разработка математической модели оценки качества предпроизводственных процессов ЖЦ РЭП на основе вероятностных характеристик несоответствий;
2. Разработка рекурсивной математической модели оценки и прогнозирования качества процессов производства РЭП;
3. Разработка методики автоматизации и цифровизации трудноформализуемых предпроизводственных процессов конструкторско-технологической подготовки для сокращения времени подготовки и снижения количества несоответствий;
4. Разработка методики оценки сложности и количественных характеристик монтажа РЭП для ускорения их анализа, повышения точности и снижения дефектов за счет внедрения цифровых технологий;
5. Разработка методики автоматического определения технических параметров ЭКБ посредством использования сетевых ресурсов с целью непрерывного обновления базы данных для повышения результативности подготовки процесса монтажа ЭКБ.

Предмет исследования – модели и методики обеспечения результативности процессов конструкторско-технологической подготовки производства для прогнозирования качества РЭП.

Объект исследования – качество организации трудноформализуемых процессов предпроизводственных стадий ЖЦ РЭП.

Теоретической и методологической базой исследования послужили исследования российских и зарубежных ученых в области организации, цифровизации и автоматизации производства электроники, методы математического анализа, теории вероятностей, алгоритмизации и программирования, создания баз данных (БД).

Тематика работы соответствует областям исследования пп. 3, 8, 9, 15. Паспорта специальности 2.5.22. «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства».

На защиту выносятся следующие результаты исследования:

1. Разработана модифицированная версия обобщённой математической модели оценки качества процессов, адаптированная для этапа комплектования электронных компонентных баз, которая за счёт учёта вероятностных характеристик несоответствий поставок и параметров совместимости компонентов обеспечивает повышение точности выявления несоответствий входных материалов по сравнению с традиционными методиками контроля качества.
2. Разработана рекурсивная математическая модель оценки качества процессов производства РЭП, которая за счет учета вероятностных характеристик несоответствий на контролируемых этапах жизненного цикла и механизма адаптивной коррекции обеспечивает более точное прогнозирование дефектов по сравнению с существующими методиками.
3. Разработана методика автоматизации процессов предпроизводственной подготовки радиоэлектронной продукции, реализующая алгоритмизацию трудноформализуемых операций конструкторско-технологической подготовки в CAM-системах, что обеспечивает снижение количества несоответствий и обеспечение требований стандартов качества.
4. Разработана методика автоматизированного формирования параметров компонентов радиоэлектронной продукции на основе интеграции с базами технологических данных, обеспечивающая стандартизацию процессов предпроизводственной подготовки за счёт исключения ручного ввода и связанных с ним ошибок.
5. Разработана методика автоматического определения параметров ЭКБ с использованием сетевых ресурсов, обеспечивающая цифровизацию процесса анализа монтажа печатных плат за счёт автоматизированного сбора и обработки технических характеристик компонентов, что повышает точность и эффективность предпроизводственной подготовки по сравнению с методиками поиска и верификации данных вручную.

Научной новизной обладают следующие результаты исследования:

1. Предложена модификация обобщённой математической модели оценки качества,

специализированная для этапа комплектования ЭКБ, отличающаяся от известных учётом вероятностных характеристик совместного функционирования компонентов и динамики их поставок, обеспечивая превентивное прогнозирование несоответствий, что отсутствует в традиционных методиках входного контроля.

2. Разработана рекурсивная математическая модель поэтапной оценки и прогнозирования качества процессов производства РЭП, основанная на расчете вероятностных характеристик несоответствий на контролируемых этапах автоматизированных производственных систем, которая за счет учета взаимного влияния технологических стадий и механизма адаптивной коррекции обеспечивает динамическое уточнение оценок качества в отличие от традиционных статических методов контроля.

3. Предложена методика автоматизации трудноформализуемых операций предпроизводственной подготовки в CAM-системах для радиоэлектронного производства, основанная на алгоритмической обработке топологии ПП и технологических ограничений, что в отличие от известных методик устраняет ключевые источники несоответствий, возникающие при ручном выполнении трудноформализуемых технологических процедур в современных CAM-средах.

4. Разработана методика автоматизированного формирования параметров компонентов РЭП путём обработки баз технологических данных, которая в отличие от известных позволяет формализовать процесс передачи характеристик ЭКБ и исключить субъективные ошибки технологической подготовки производства.

5. Разработана методика автоматического пополнения базы параметров компонентов с использованием открытых сетевых ресурсов, в отличие от известных позволяющая поддерживать актуальность технических данных и минимизировать ошибки предпроизводственного анализа, характерные для ручных методов работы с ЭКБ.

Обоснованность и достоверность. Обоснованность научных результатов исследования определяется корректным применением математического аппарата теории вероятностей и корректным написанием программного кода разработанных методик, что подтверждается результатами практического внедрения. Достоверность результатов проведенных исследований обеспечивается использованием современных методов обработки информации математической статистики и подтверждена совпадениями результатов исследования с экспериментальными данными, практической реализацией разработанных методик.

Теоретические результаты:

1. Модифицированная версия обобщённой математической модели оценки качества процессов, адаптированная для этапа комплектования ЭКБ, обеспечивает теоретическую основу для превентивного прогнозирования несоответствий, что расширяет возможности традиционных методов входного контроля за счёт учета стохастических факторов и временных зависимостей.

2. Рекурсивная математическая модель оценки качества процессов производства РЭП теоретически обосновывает механизм адаптивной коррекции, учитывающий взаимное влияние стадий, что принципиально отличает её от статических моделей, не способных к динамическому уточнению оценок.

3. Методика автоматизации процессов предпроизводственной подготовки радиоэлектронной продукции, реализующая алгоритмизацию трудноформализуемых операций конструкторско-технологической подготовки в CAM-системах, теоретически обосновывает переход от экспертных решений к алгоритмическим методам обработки топологии ПП. Это создает основу для исключения субъективных ошибок при технологической подготовке производства, что невозможно в традиционных подходах, основанных на ручных операциях.

4. Методика автоматизированного формирования параметров компонентов радиоэлектронной продукции на основе интеграции с базами технологических данных обеспечивает полную автономность предпроизводственного анализа за счет исключения ручного ввода и проверки параметров.

5. Методика автоматического определения параметров ЭКБ с использованием сетевых ресурсов обеспечивает непрерывную актуализацию технологической информации за счет интеллектуального сопоставления характеристик ЭКБ из открытых источников.

Практическая значимость:

1. Модифицированная версия обобщённой математической модели оценки качества процессов, адаптированная для этапа комплектования ЭКБ, снижает вероятность появления несоответствий на этапе комплектования изделия на 3-7%.

2. Рекурсивная математическая модель оценки качества процессов производства РЭП позволяет сократить вероятность появления несоответствий при выполнении автоматического монтажа на 7-10%.

3. Методика автоматизации процессов предпроизводственной подготовки радиоэлектронной продукции, реализующая алгоритмизацию трудноформализуемых операций конструкторско-технологической подготовки в CAM-системах, позволяет сократить время проведения определенных операций предпроизводственной подготовки производства печатных плат на 37% и снизить уровень несоответствий при проведении анализа топологии печатной платы из состава РЭП на 10%.

4. Методика автоматизированного формирования параметров компонентов радиоэлектронной продукции на основе интеграции с базами технологических данных позволяет сократить время анализа количественных показателей новых итераций РЭП, поставленных на производство, на 85-94% и снизить количество несоответствий на 12%.

5. Методика автоматического определения параметров ЭКБ с использованием сетевых ресурсов позволяет сократить время анализа количественных показателей новых типов РЭП на 85-94% и снизить количество несоответствий на 12%.

Личный вклад автора состоит в непосредственной разработке а) модификации обобщенной математической модели процессов на основе плотностей вероятности в части оценки вероятности появления несоответствий на этапе комплектования изделия; б) рекурсивной модели поэтапной оценки качества электронной продукции на основе расчета вероятностных характеристик несоответствий; в) методик автоматизации предпроизводственной подготовки РЭП; г) методики определения сложности и количественных показателей параметров монтажа РЭП; д) методики автоматического поиска параметров ЭКБ посредством использования сетевых ресурсов для доступа к базам данных мировых производителей ЭКБ.

Внедрение результатов диссертационного исследования.

Результаты основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационном исследовании, использованы в ООО «ПАНТЕС», АО «НИИ «Масштаб», ООО «НПФ «Торэкс», что подтверждено соответствующими актами внедрения. Результаты исследования также внедрены в образовательный процесс ФГАОУ ВО ГУАП.

Апробация работы: основные результаты исследования обсуждались на 3 международных форумах и 1 международной научно-практической конференции.

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 20 печатных изданиях, из них 9 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях, в том числе 3 – без соавторов, одна работа в научных изданиях, индексируемых в Международных реферативных базах, 5 статей в других изданиях, одно учебное пособие, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертационной работы: диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованной литературы из 115 наименований. Текст диссертации изложен на 150 страницах, содержит 55 рисунков и 22 таблицы.

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 процессов предпроизводственной подготовки РЭП в области контрактного производства электроники (КПЭ). Определены актуальность и перспективы развития указанных областей.

В данный момент времени мировой вектор развития предпроизводственного этапа направлен на автоматизацию и цифровизацию всех процессов подготовки к запуску производства РЭП. Однако, сохраняется важная проблема, связанная с трудноформализуемыми процессами, на которых исключить рутинное выполнение действий не представляется возможным. Ввиду этого разработки в области программного обеспечения (ПО) направлены на

снижение влияния «человеческого фактора» посредством создания сегментированных и диалоговых технологий внесения изменений в КД РЭП.

Значительный вклад в повышение качества производства РЭП внесла концепция «индустрия 4.0», благодаря внедрению принципов 4-й промышленной революции, таких как IoT, M2M и т.д., процент продукции несоответствующей стандарту «IPC-A-610» после прохождения линии автоматического монтажа сокращается. Результат достигается за счет снижения влияния действий оператора линии на технологический процесс в режиме реального времени.

В РФ наблюдается тенденция к передаче изготовления РЭП на контрактную основу, что позволяет предприятиям-разработчикам значительно снизить расходы на оборудование и кадровый состав. Исходя из данной тенденции, возникает важная проблема: существующие технологии сквозного проектирования и производства не действуют, ввиду участия большого количества контрагентов в ЖЦ производства РЭП, каждое предприятие выполняет возложенную на него задачу: разработку, монтаж, закупку комплектующих изделий (КИ), изготовление ПП.

На рисунке 1 представлен ЖЦ производства РЭП. Цикл разделен на 3 основных этапа: разработка РЭП (схемотехнические и конструкторские работы); предпроизводственные процессы; производство.

Мировая практика в области КПЭ показывает, что участие разных контрагентов возможно не только на разных этапах, но и в рамках одного этапа. Например, в современной радиоэлектронной промышленности наблюдается частая практика передачи предприятием-разработчиком отдельных операций по конструированию изделия сторонней организации, обладающей соответствующими компетенциями, для минимизации нагрузки на собственный конструкторский отдел.

При анализе операций ЖЦ изделия были выявлены следующие проблемы:

1. Большое количество операций, имеющих значительные затраты временного ресурса, при технологической подготовке производства (ТПП) изделия;
2. Большая длительность определения количественных показателей монтажа РЭП;
3. Классификация сложности монтажа имеет субъективный характер и подвержена влиянию «человеческого фактора»;
4. Длительный поиск информации посредством электронных ресурсов или в КД РЭП;
5. Отсутствие сквозной модели управления ЖЦ изделия, ввиду участия нескольких контрагентов в создании РЭП.

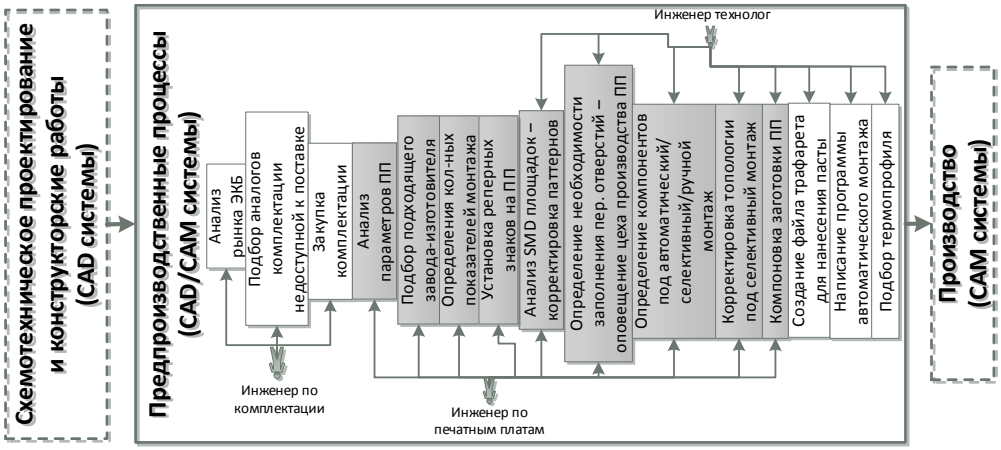

Рисунок 1 – Жизненный цикл производства РЭП

В ходе анализа текущего состояния и перспектив развития технологических процессов при производстве электроники выявлено, что основными направлениями повышения качества продукции является поэтапная цифровизация предпроизводственных процессов.

Во втором разделе:

1. Разработана модифицированная версия обобщённой математической модели оценки качества процессов, адаптированная для этапа комплектования ЭКБ;
2. Разработана рекурсивная математическая модель поэтапной оценки качества процессов производства РЭП на основе расчета вероятностных характеристик несоответствий на контролируемых этапах ЖЦ продукции.

Модифицированная версия обобщённой математической модели оценки качества процессов, адаптированная для этапа комплектования электронных компонентных баз, которая за счёт учёта вероятностных характеристик несоответствий поставок и параметров совместимости компонентов обеспечивает повышение точности выявления несоответствий входных материалов по сравнению с традиционными методиками контроля качества.

Существующая обобщенная модель позволяет в дополнение к традиционным средствам информационных технологий создать «сквозной» инструментарий как для проектных, так и для этапов производства РЭП. В этом случае уже во время схемотехнического проектирования становится возможным учет технологических требований при ТПП изделий, которые заданы в ТЗ, а также возможно оценить сроки и экономические показатели производства РЭП. Движение РЭП по конкретным этапам ЖЦ в процессе проектирования и подготовки производства в общем виде представлено на рисунке 2.

В соответствии с предложенной схемой происходит «движение» цифровой математической модели объекта от этапов проектирования к производству «сверху-вниз» (прямой проход), а корректировка параметров модели «снизу-вверх» (обратный проход).

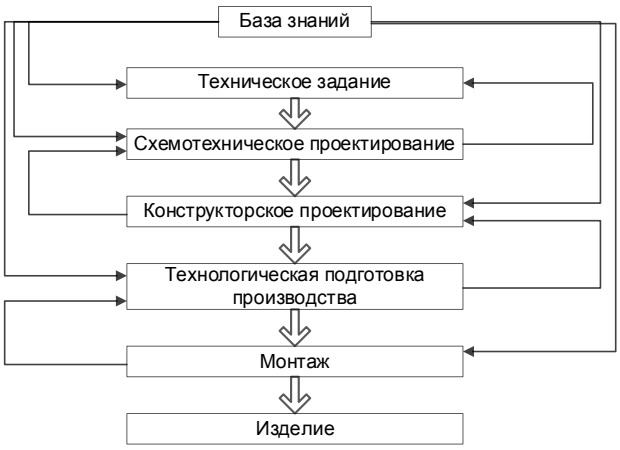

Рисунок 2 - Обобщенная модель ЖЦ электронного изделия

Согласно предложенной модели на всем ЖЦ появляется возможность оценки вероятности перехода на следующий этап, а также вероятности возврата на предыдущий. Обратный проход по оценке качества процессов ЖЦ РЭП может быть представлен в виде корректировки этапов проектирования, ТПП и монтажа серверных материнских ПП.

Обобщенная модель охватывает возможные варианты взаимодействия процессов, но требует получения и сложной математической обработки статистических исходных данных для каждого этапа, прямых и обратных функций преобразования параметров на смежных этапах для обеспечения оценки качества РЭП.

ЖЦ создания РЭП укрупненно представлен тремя основными этапами: проектирование, предпроизводственные процессы и производство. Все этапы непрерывно контролируются людьми, что повышает вероятность возникновения несоответствий из-за человеческого фактора. Этап проектирования, насколько позволяет доля рутинных операций, достаточно формализован, автоматизирован средствами САПР, CAD и рассмотрен во многих работах. Однако, ТПП имеет в составе трудноформализуемые процессы. На этом этапе требуется постоянный анализ и принятие решений, для которых существуют проблемы полной автоматизации. В известной литературе необходимые методы отсутствуют. В то же время полезную новизну представляет разработка инструментария в виде методов и алгоритмов на основе диалога ЭВМ и лица принимающего решения (ЛПР). Такой подход позволит снизить вероятность ошибки из-за человеческого фактора. Для оценки результативности контроля качества производства РЭП предложена методика поэтапной оценки вероятностей несоответствий.

Одним из первых этапов ТПП является анализ применяемой ЭКБ: определение каналов поставки и цен, а также идентификация технических параметров монтажа ЭКБ на ПП. При выполнении указанных действий ЛПР работают с большим объемом информации, которое можно представить в виде множеств: применяемой ЭКБ и каталогов поставщиков КИ. При

работе с множествами высока вероятность ошибки из-за большого номенклатурного перечня, применяемого в РЭП (например, материнские ПП содержат 3000-7000шт. компонентов).

В рамках данной работы было рассмотрено отображение множеств и появление их итераций на этапе «подбор/поставка КИ» (рисунок 3).

Для описания этапа введем следующие множества:

1. Спецификация (СП) изделия в момент передачи КД в отдел подбора КИ является исходным множеством S_0 $\{S_{01}, S_{02},\ldots,S_{0n}\}$, где $S_{01}, S_{02},\ldots,S_{0n}$ – наименования КИ.
2. Последующие итерации СП обозначим множествами $S_1, S_2,\ldots S_n$
3. Мировая библиотека ЭКБ является множеством S_W $\{S_{W1}, S_{W2}, \ldots, S_{Wn}\}$, где $S_{W1}, S_{W2},\ldots, S_{Wn}$ - наименования существующих в мире компонентов.
4. Библиотека ЭКБ, которая доступна к закупке, является множеством $S_A\{S_{A1}, S_{A2}, \ldots, S_{An}\}$, где $S_{A1}, S_{A2}, \ldots, S_{An}$ – наименования компонентов доступных к закупке.

Представленные множества имеют следующие взаимосвязи: $S_A \subseteq S_W$; $S_0 \subseteq S_W$(в случае отсутствия ошибок на стадии проектирования); $S_0 \subseteq S_A$ (в случае отсутствия ошибок на стадии проектирования и доступности всей заложенной в изделии ЭКБ на рынке).

Первым этапом производится проверка СП. В процессе проверки возможно выявление ошибок документа. До проверки и устранения несоответствий отображение f: $S_0 \rightarrow S_W$ может быть сюръекцией, что с точки зрения оформления по ЕСКД не верно, в случае если рассматривается СП, по которой в основном проводятся закупка и производство изделий. Основной целью данного этапа является приведение полученного множества S_0 к множеству S_{0n}, так, чтобы в итоге отображение множества, применяемой ЭКБ, и мировой библиотеки имело вид инъекции: f:$S_{0n} \rightarrow S_W$. После приведения S_0 к S_{0n} производится анализ каналов поставки, на котором выявляется ЭКБ, недоступная к закупке. По факту каждого изменения возникает новая итерация множества S_{n+1}. В момент поставки последнего компонента множество применяемой ЭКБ в изделии приобретает окончательный вид S_K. Однако, в процессе монтажа есть вероятность выявления ошибок, связанных с КИ, допущенных на ранних этапах, так, во время их устранения возможно возникновение новой итерации множества ЭКБ. После проведения всех необходимых действий отображение множеств f:$S_k \rightarrow S_A$ примет вид инъекции.

На рисунке 3 представлена упрощенная модель обработки КИ при производстве РЭП. Для оценки вероятности возникновения несоответствия на каждом этапе в работе используется определение вероятностной характеристики случайной величины через δ-функцию.

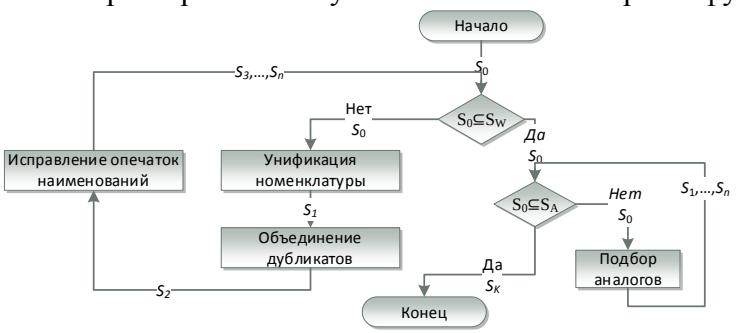

Рисунок 3 – Упрощенный алгоритм приведения отображения множеств $f:S_k \rightarrow S_A$ к инъекции

Контроль качества по оценкам на основе вероятностных характеристик объекта проектирования и производства проводится на всех этапах. Эти оценки представляются известными функциями (математическими ожиданиями, дисперсиями, моменты более высокого порядка) от плотностей вероятностей распределения, измеряемых критериальных переменных как характеристик качества.

В рамках данной работы случайная переменная ξ является компонентом, применяемым в составе изделия и может принимать n различных значений среди множеств S_W. Соответствующая функция плотности вероятности имеет вид:

$$f(x) = \sum_{k=1}^{N} p_k \delta(x - x_k) \qquad (1)$$

δ-функция в данном случае позволяет ввести логический оператор для выбора одного из

возможных вариантов ЛПР. Количество возможных значений $X_1,\ldots X_n$, которые принимает величина, и вероятности $p_1,\ldots,p_n$ различны для каждого КИ и рассчитываются в индивидуальном порядке по известным в теории вероятностей формулам, учитывающим: похожие наименования, ближайшие номиналы, которые могут быть применены в изделии, не влияя на его работоспособность и т.д. Интервал корректных значений задается множеством S_A, а также значениями допустимых отклонений по конкретному номиналу $[a, b]$. Таким образом, вероятность может быть вычислена, исходя из общих свойств плотности по формуле:

$$P(a \le \xi \le b) = \int_a^b f(x)dx = \int_a^b \sum_{k=1}^{N} p_k \delta(x - x_k)dx = \sum_{k=1}^{N} p_k \int_a^b \delta(x - x_k)dx, \quad (2)$$

где

$$\int_a^b \delta(x - x_k)dx = \begin{cases} 1, k = x_a \\ 0, k = x_D \end{cases}, \quad (3)$$

x_a – компоненты, входящие в интервал [a, b], x_D – компоненты, не попадающие в интервал [a, b]. Таким образом, вероятность несоответствия на каждом этапе рассчитывается:

$$P_k(a \le \xi \le b) = 1 - \sum_k^N p_k. \quad (4)$$

При этом важно учитывать условие нормирования по каждому компоненту.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = \sum_1^N p_k = 1. \quad (5)$$

На рисунке 4 представлена упрощенная модель ТПП в части обеспечения КИ, с указанием контролируемых переходов между этапами.

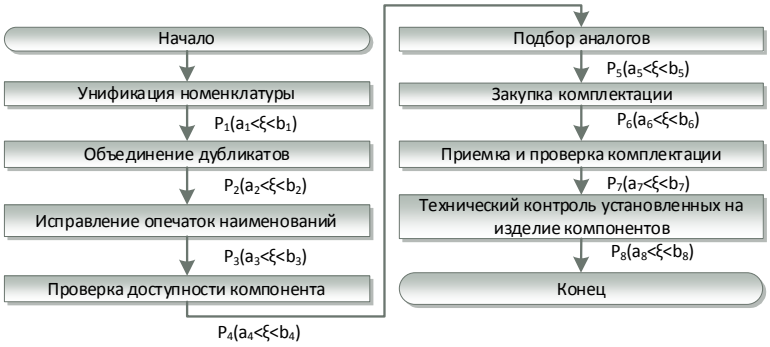

Рисунок 4 – Упрощенная модель ТПП в части обеспечения изделия необходимыми КИ

Для произведения расчетов по представленной математической модели на вход предоставляются данные о вероятности отсутствия несоответствий с конкретным номиналом (данные учитывают следующие вероятности: срыв поставки, контрафактная партия, не оригинальные компоненты, бывшие в употреблении компоненты и другие определенные конкретным производством типы отклонений).

Вероятность того, что изделие будет исправным, вычисляется по закону сложения и умножения вероятностей исправности всех компонентов в его составе.

Рекурсивная математическая модель оценки качества процессов производства РЭП, которая за счет учета вероятностных характеристик несоответствий на контролируемых этапах жизненного цикла и механизма адаптивной коррекции обеспечивает более точное прогнозирование дефектов по сравнению с существующими методиками.

В рамках исследования была выведена рекуррентная формула оценки вероятности возникновения несоответствий на четырех контрольных точках: верификация компонентной базы; SPI; АОИ после установщика компонентов; АОИ после печи оплавления.

Для модели введены следующие переменные:

S_0 - количество паяных соединений в серии (для малосерийного производства 20000шт.);

$p_1 \ldots p_4$ – вероятности несоответствий на локально рассматриваемых этапах;

$P_1 \ldots P_4$ – вероятностные характеристики несоответствий по результатам контроля с учетом предыстории.

N_n - математическое ожидание количества дефектных соединений, выявленных на этапе n.

Расчет количества паяных соединений несоответствующих стандарту IPC-610 рассчитывается по формулам:

$$M[N_1] = S_0 p_1 \quad (6)$$

$$M[N_2] = (S_0 - S_0 p_1) p_2 = S_0 p_2 (1 - p_1) \quad (7)$$

$$M[N_3]=[S_0 - S_0 p_2(1- p_1)] p_3=S_0 p_3[1 - p_2 (1 - p_1)]=S_0 [p_3 - p_2 p_3 (1 - p_1)] = S_0 p_3 (1- p_2 + p_1 p_2) \quad (8)$$

$$M[N_4] = [S_0 - S_0 p_3[1 - p_2 (1- p_1)]p_4=S_0 p_4[1–p_3+p_2 p_3 (1 - p_1)]=S_0 p_4 (1– p_3 + p_2 p_3 - p_1 p_2 p_3) \quad (9)$$

Оценка плотности вероятности P_n несоответствий на n-ном этапе с учетом предыстории появления несоответствий на предыдущих n-1 этапах представлена знакопеременным рядом:

$$P_n=p_n(1-p_{n-1}+p_{n-2} p_{n-1}-p_{n-3} p_{n-2} p_{n-1}+p_{n-4} p_{n-3} p_{n-2} p_{n-1}-p_{n-5} p_{n-4} p_{n-3} p_{n-2} p_{n-1}+p_{n-6} p_{n-5} p_{n-4} p_{n-3} p_{n-2} p_{n-1} - \dots + p_{n-(n-1)} \dots p_{n-1}), n=2k+1. \quad (10)$$

Для общего случая в математической модели используется ПРВ непрерывных случайных величин, определяемых для конкретных проблемных областей. Рассматриваемому наукоемкому малосерийному производству соответствует вероятностное распределение дискретного типа Пуассона. В модели могут использоваться доступные вероятностные характеристики несоответствий: частость, вероятность, плотность вероятности.

В третьем разделе разработаны методики автоматизации операций ТПП, которые позволяют сократить время анализа изделий, снизить влияние «человеческого фактора», а также освободить кадровый ресурс для выполнения других задач.

Методика автоматизации процессов предпроизводственной подготовки радиоэлектронной продукции, реализующая алгоритмизацию трудноформализуемых операций конструкторско-технологической подготовки в CAM-системах, что обеспечивает снижение количества несоответствий и обеспечение требований стандартов качества.

Одним из первых этапов DFM-анализа является оценка расстояния топологии от не металлизированных отверстий. Несоблюдение требуемого расстояния приводит к невозможности изготовления ПП. На рисунке 5 представлена методика определения требуемого зазора. На текущий момент указанная операция производится в ручном режиме, что увеличивает время анализа.

Рисунок 5 – Алгоритм автоматизации проверки отступов от не металлизированных отверстий

Типичной проблемой является отсутствие при конструировании РЭП проверки на наличие масочных перемычек между площадками устанавливаемых компонентов. Наличие перемычек и их ширина непосредственно влияет на себестоимость изготовления изделия.

При ручном поиске и устранении несоответствующих технологии изготовителей масочных перемычек затрачиваются значительные кадровые ресурсы. Для автоматизации данной операции создана методика автоматической корректировки корпусов (рисунок 6).

Рисунок 6 – Алгоритм корректировки корпусов

Обязательным требованием автоматического монтажа является наличие реперных знаков (РЗ) на ПП. В основном на этапе конструирования данные элементы не добавляются, либо не соответствуют требованиям. Таким образом, выбор места и размещение РЗ на ПП определяет производство. Методика автоматизации размещения представлена на рисунке 7.

Анализ компоновки SMD и THT компонентов в составе РЭП имеет как экономическую составляющую, так и определение возможности использования того или иного вида пайки. Для применения селективной пайки достаточно соблюдать расстояние от чип-компонентов до отверстий под THT монтаж.

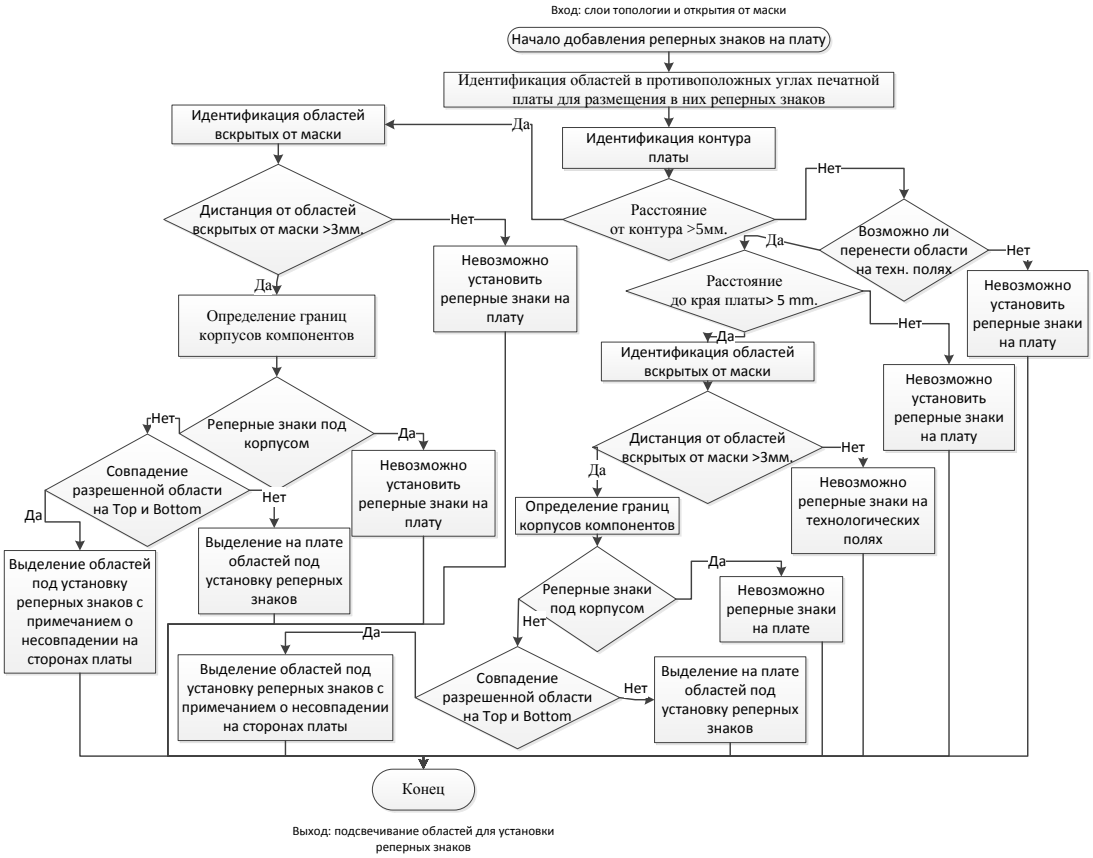

Рисунок 7 – Алгоритм автоматизации установки реперных знаков на ПП

В случае ошибки при определении расстояния чип компонентов от штыревых паек возникают следующие последствия: корректировка программы в процессе монтажа; повреждение установленных SMD компонентов; замена поврежденных компонентов.

На анализ ручным методом тратится много времени. В рамках работы была разработана

методика определения КИ, препятствующих селективному монтажу на ПП (рисунок 8). В данном случае автоматизировать процесс возможно только посредством диалога ЭВМ-ЛПР, ввиду трудноформализуемости процесса.

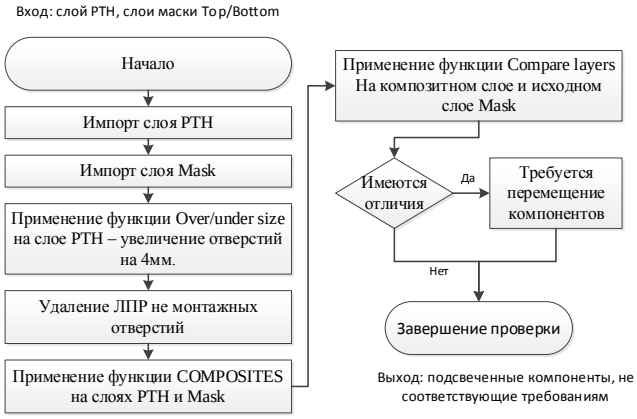

Рисунок 8 – Алгоритм автоматизации процесса адаптации ПП под селективную пайку

С целью повышения эффективности процесса сборки РЭП ПП группируются в мультизаготовки, что способствует максимальной загрузке технологического оборудования. При формировании заготовки важно так же учесть ее последующее разделение и скомпоновать панель так, чтобы минимизировать риск повреждения КИ и время разделения. Предпочтительным методом механической обработки заготовок является скарайбирование, ввиду простоты разделения мультизаготовок, так как при разделении панелей на перфорации велик риск повреждения КИ. На рисунке 9 представлена методика обозначения частей контура для скрайбирования.

Рисунок 9 – Алгоритм автоматизации процесса разметки обработки контура

В процессе анализа ПП возможно обнаружить наличие переходных отверстий в контактных площадках. Причинами подобного конструкторского решения могут быть как необходимость получения определенных электрических параметров, так и игнорирование технологических рекомендаций. Изделие с подобным расположением отверстий будет исправно работать, однако, подобное решение влияет на экономическую составляющую автоматического монтажа и на стоимость ПП.

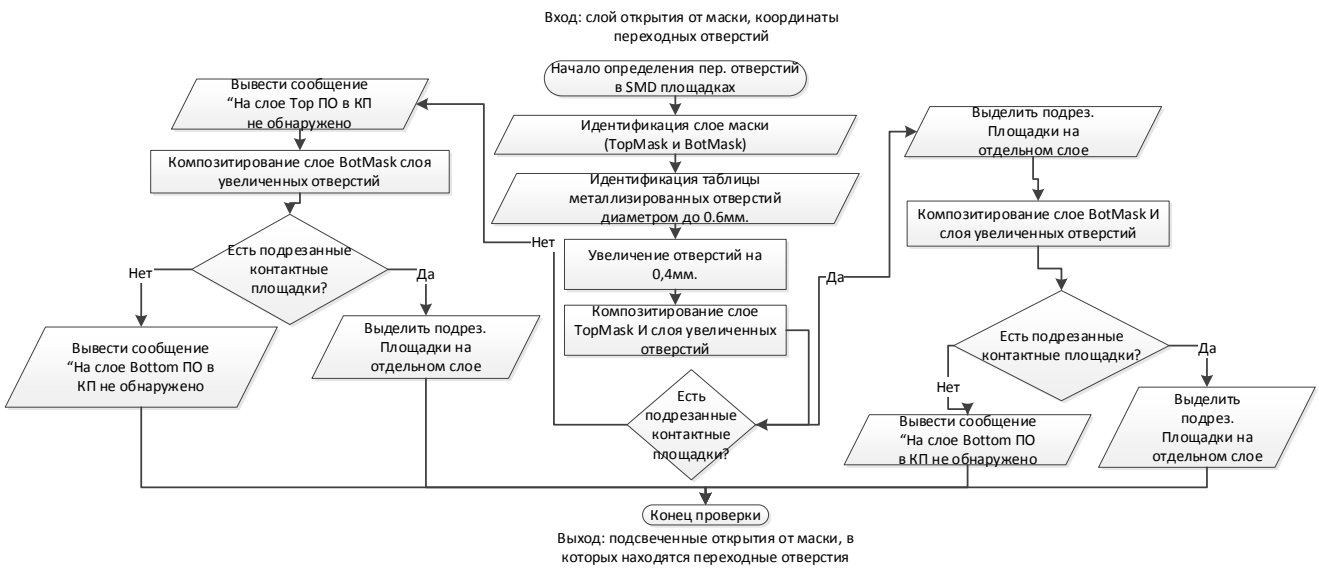

Рисунок 10 - Алгоритм определения переходных отверстий в контактных площадках

Сложность монтажа заключается в том, что при нанесении пасты методом трафаретной печати и последующей установки компонентов припой оплавляется в печи и вытекает через отверстие. Ввиду вышесказанного паяное соединение на подобных площадках не соответствует требованиям IPC-610, либо отсутствует. Одним из методов сохранения исходной топологии и устранения негативного влияния на монтаж является тентирование отверстий по VII типу, что повышает стоимость изготовления ПП.

В случае ошибки на данном этапе значительно повышаются трудозатраты. Для минимизации влияния «человеческого фактора», а также снижения времени анализа ПП разработан алгоритм, представленный на рисунке 10.

Методика автоматизированного формирования параметров компонентов радиоэлектронной продукции на основе интеграции с базами технологических данных, обеспечивающая стандартизацию процессов предпроизводственной подготовки за счёт исключения ручного ввода и связанных с ним ошибок.

Мировая ситуация с ЭКБ приводит к необходимости непрерывной актуализации доступности КИ и внесения изменений в КД РЭП. Любое изменение КД РЭП в рамках КПЭ приводит к необходимости проведения повторного анализа КД изделия.

При анализе монтажа ЭКБ на ПП проводится полная проверка каждого номинала из СП и фиксирование его технологических параметров для последующего сводного анализа. Данная рутинная операция повышает нагрузку на инженерный отдел. Например, анализ сборки материнской ПП ввиду объема устанавливаемых номиналов проводится вручную и занимает 3ч. Из-за необходимости оперативного анализа и внесения корректировок высок риск появления ошибок по причине «человеческого фактора», а как следствие, экономические потери и увеличение трудоемкости. С целью снижения влияния «человеческого фактора», а также времени анализа в рамках данной работы была предложена методика автоматического анализа технологических параметров ЭКБ.

Разработанный алгоритм в своей программной реализации осуществляет обработку информации в формате «.xlsx» при помощи библиотеки openpyxl. Графический дизайн реализован при помощи библиотеки tkinter. ПО позволяет анализировать каждый номинал в СП РЭП при помощи БД ЭКБ, что позволяет исключить рутинный подсчет параметров инженерами и оперативно получить необходимые данные: количество паяных соединений SMD и THT монтажа; количество сложных корпусов (BGA, LGA…) и количество их номиналов; количество компонентов миниатюрных типоразмеров пассивных компонентов; количество нестандартных компонентов, которые влияют на технологический процесс.

После заполнения, ПО производит пересчет и выводит сводную информацию по изделию, предоставляя возможность в минимальные сроки определить вид технологии монтажа РЭП, ресурсы с учетом квалификации персонала, экономические показатели производства РЭП. Информация, предоставляемая ПО, является точной, так как заполняется по СП, что является

предпочтительным вариантом расчета, чем получение report данных из CAD программ.

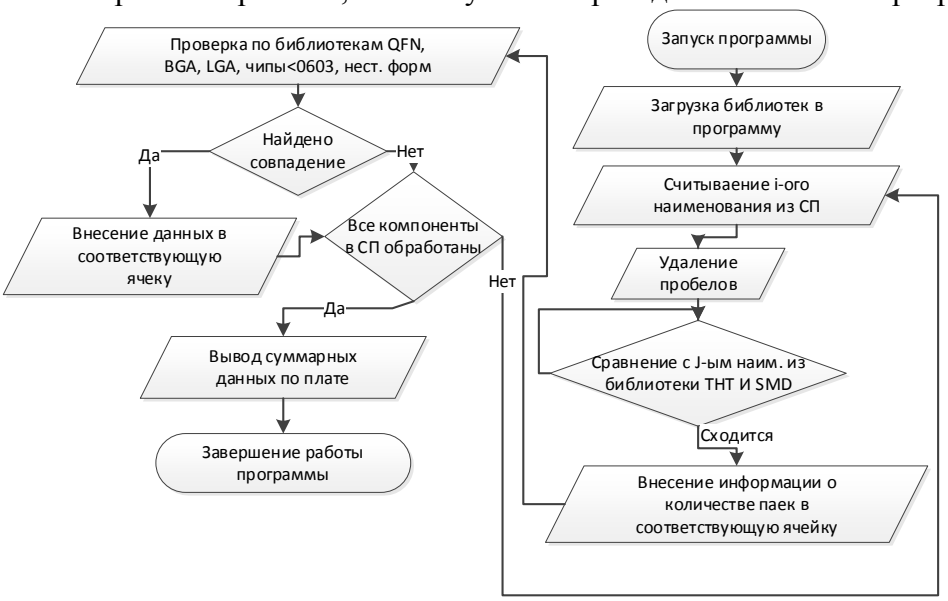

Рисунок 11 – Алгоритм подсчета параметров монтажа при помощи базы данных.

При внедрении разработанного алгоритма время подсчета параметров монтажа для материнских ПП сократилось на 85-94% в зависимости от количества компонентов, хранящихся в базе данных. Упрощенный алгоритм ПО представлен на рисунке 11.

Методика автоматического определения параметров ЭКБ с использованием сетевых ресурсов, обеспечивающая цифровизацию процесса анализа монтажа печатных плат за счёт автоматизированного сбора и обработки технических характеристик компонентов, что повышает точность и эффективность предпроизводственной подготовки по сравнению с методиками поиска и верификации данных вручную.

На данный момент мировые библиотеки ЭКБ имеют большое количество наименований. В случае расчета параметров похожих по применению изделий, разработанный алгоритм показывает положительные результаты и способен определить 60-90% КИ. Однако, в условиях КПЭ среднесерийного и опытного масштабов номенклатура сильно отличается друг от друга, что значительно снижает количество совпадений спецификации с базой данных.

Для повышения количества определяемых компонентов в алгоритме реализован парсинг (рисунок 12) каталогов мировых поставщиков КИ посредством использования библиотеки selenium.

Рисунок 12 – Парсинг по каталогам мировых поставщиков КИ

После сравнения с БД алгоритм прорабатывает неопределенные компоненты, запрашивая информацию на сайтах поставщиков КИ и занося ее в специальные графы. После получения необходимой информации алгоритм заносит параметры в БД.

Представленный алгоритм проводит автоматический анализ, для запуска ЛПР требуется только указать путь и название файла спецификации к изделию.

На рисунке 13 представлены исходные данные, необходимы для запуска программы.

	A	C	D
1	Наименование	Кол-во	Примечание
2	CA050M0047REH-0607	4	ECAP SMD 47UF 50V 85C 6.0X7.0
3	SS025M0100BZF-0607	2	ECAP RADIAL 100UF 25V 105C 6.0X7.0
4	CE050M0220REG-1010	1	ECAP SMD 220UF 50V 105C 10.0X10.0
5	VJ0805Y104KXACW1BC	7	CERCAP 0805 0.1UF 50V X7R 10%
6	UMK325BJ106MM-P	6	CERCAP 1210 10UF 50V X5R 20%
7	293D106X0025C2TE3	9	TECAP 10UF 25V C 20%
8	Подстроечный 3314G-1, 1 кОм	1	3314G-1-102E
9	Дав ПРО-04	1	
10	AD8611AR	1	AD8611ARZ
11	DS1338Z-33+	1	DS1338Z-33+T&R
12	FT2232HQ	1	FT2232HQ
13	LM23605TZ	2	LMZ23605TZ/NOPB
14	SWT-4		
15	KLS1-SMA001		

Рисунок 13 – Исходные данные для запуска программы

На рисунке 14 представлены выходные данные обработки файла.

F	G	H	I	J	K	L
THT	SMD	BGA	LGA	QFN	Чипы <0603	Нест.Форм.
	2					
	2					
	2					
	2					
	2					
	2					
	3					
	24					
	8					
	8					
	65			65		
	8					
						кнопка
						SMA

Суммарные данные						
	THT	SMD	BGA	LGA	QFN	Чипы <0603
Количество паек	147	696	0	0	65	0
Количество номиналов	10	37	0	0	1	0
Количество компонентов	13	78	0	0	1	0
Класс сложности монтажа	E					

Рисунок 14 – Выходные данные программы

Внедрение алгоритма позволяет повысить количество автоматически заполняемых номиналов и за счет использования сетевых ресурсов обеспечить результат сокращения времени анализа на 85-94% даже при отсутствии информации об ЭКБ в локальной базе данных.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе достигнута поставленная цель исследования с помощью разработанных методик оценки и обеспечения качества предпроизводственного этапа ЖЦ РЭП. Полученные в ходе исследования результаты позволяют улучшить операции технологической подготовки и организации предпроизводственного этапа путем уменьшения времени процессов и повышения достоверности контроля качества. По совокупности полученных в работе результатов возможно сделать вывод **о решении важной научно-практической задачи:** повышение качества и результативности предпроизводственных процессов при выпуске серийной и опытной продукции в рамках динамично развивающейся ситуации на рынке ЭКБ для оперативной адаптации РЭП под доступную ЭКБ.

Автором достигнуты следующие результаты, имеющие научную новизну и практическое значение:

1. Разработана модифицированная версия обобщённой математической модели оценки качества процессов, адаптированная для этапа комплектования электронных компонентных баз, которая за счёт учёта вероятностных характеристик несоответствий поставок и параметров совместимости компонентов обеспечивает повышение точности выявления несоответствий входных материалов по сравнению с традиционными методиками контроля качества.

2. Разработана рекурсивная математическая модель оценки качества процессов производства РЭП, которая за счет учета вероятностных характеристик несоответствий на контролируемых этапах жизненного цикла и механизма адаптивной коррекции обеспечивает более точное прогнозирование дефектов по сравнению с существующими методиками.

3. Разработана методика автоматизации процессов предпроизводственной подготовки радиоэлектронной продукции, реализующая алгоритмизацию трудноформализуемых операций конструкторско-технологической подготовки в CAM-системах, что обеспечивает снижение количества несоответствий и обеспечение требований стандартов качества.

4. Разработана методика автоматизированного формирования параметров компонентов радиоэлектронной продукции на основе интеграции с базами технологических данных, обеспечивающая стандартизацию процессов предпроизводственной подготовки за счёт исключения ручного ввода и связанных с ним ошибок.

5. Разработана методика автоматического определения параметров ЭКБ с использованием сетевых ресурсов, обеспечивающая цифровизацию процесса анализа монтажа печатных плат за счёт автоматизированного сбора и обработки технических характеристик компонентов, что повышает точность и эффективность предпроизводственной подготовки по сравнению с методиками поиска и верификации данных вручную.

Разработанные модели позволяют сократить время предпроизводственного этапа ЖЦ РЭП, а также снизить влияние «человеческого фактора».

Внедрение основных научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, подтверждены актами внедрения, полученными от ООО «ПАНТЕС», АО «НИИ «Масштаб», ООО «НПФ «Торэкс», ФГАОУ ВО ГУАП.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях

1. Зайцев, П.С. Методика автоматизации и цифровизации предпроизводственного этапа для обеспечения качества процессов при изготовлении радиоэлектронной продукции / П.С. Зайцев, Е.А. Фролова // Наука и бизнес – 2025 – №3 – С. 159-163.

2. Зайцев, П.С. Обеспечение качества входного контроля электронных компонентов с применением нейронной сети / Г.И. Коршунов, К.А. Брусенцов, Э.С. Ярмонова, П.С. Зайцев // Контроль качества продукции. – 2024. – № 6. – С. 53-57.

3. Зайцев, П.С. Контроль качества производства электроники на основе поэтапной оценки вероятностей несоответствий и автоматизации процессов. Часть 2 / П.С. Зайцев // Контроль качества продукции – 2024 – №1 – С. 40-44.

4. Зайцев, П.С. Методика автоматического поиска и обновления БД технологических параметров для обеспечения качества электроники в условиях импортозамещения / П.С. Зайцев // Наука и бизнес: пути развития – 2024 – №2 – С. 143-148.

5. Зайцев, П.С. Контроль качества производства электроники на основе поэтапной оценки вероятностей несоответствий и автоматизации процессов. Часть 1 / П.С. Зайцев // Контроль качества продукции – 2023 – №12 – С. 59-62.

6. Зайцев, П.С. Контроль качества киберфизических систем по плотностям распределения вероятностей случайных функций как критериальных характеристик. Часть 2 / Р.И. Сольницев, Г.И. Коршунов, П.С. Зайцев // Контроль качества продукции – 2023 – №9 – С. 59-63.

7. Зайцев, П.С. Контроль качества киберфизических систем по плотностям распределения вероятностей случайных функций как критериальных характеристик. Часть 1 / Р.И. Сольницев, Г.И. Коршунов, П.С. Зайцев // Контроль качества продукции – 2023 – №8 – С. 23-27.

8. Зайцев, П.С. Обеспечение контроля качества сложных электронных систем в интеллектуальных производствах. Часть 2 / Г.И. Коршунов, А.А. Дзюбаненко, П.С. Зайцев // Контроль качества продукции – 2023 – №7 – С. 26-32.

9. Зайцев, П.С. Обеспечение контроля качества сложных электронных систем в интеллектуальных производствах. Часть 1. / Г.И. Коршунов, А.А. Дзюбаненко, П.С. Зайцев // Контроль качества продукции – 2023 – №6 – С. 28-31.

Статьи в изданиях, индексируемых в реферативных базах

10. Zaicev, P.S. Methods and algorithms of technological preparation for organizing automatic surface mount of printed circuit boards / G.I. Korshunov, P.S. Zaicev, A.A. Petrushevskaya // Journal of Physics: Conference Series (JPCS)– 2019 – P. 33076.

Учебные издания

11. Обеспечение качества производства электронной продукции на основе цифровизации и интеллектуализации процессов: учебное пособие / Г.И. Коршунов, А.А. Дзюбаненко, П.С. Зайцев. Санкт-Петербург: Изд-во ГУАП, 2024. - 92 с.

Статьи и материалы конференций

12. Зайцев, П.С. Обеспечение качества предпроизводственных процессов при помощи cals-систем в жизненном цикле радиоэлектронной продукции / Е.А. Фролова, П.С. Зайцев // Будущее знаний: вопросы развития науки, технологий и общества. Сб. статей II Международной научно-практической конференции. Мельбурн, Австралия, 06 февраля 2025 года – С. 13-18.

13. Зайцев, П.С. Математическая модель оценки вероятностей несоответствий в технологических процессах бездефектного наукоемкого производства электроники / Г.И. Коршунов, П.С. Зайцев // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве. Сб. тезисов докладов III Международного форума, Санкт-Петербург: ГУАП, 08 ноября 2023 года – С. 191-193.

14. Зайцев, П.С. Алгоритм автоматического определения технологических параметров электронной компонентной базы / Г.И. Коршунов, П.С. Зайцев. // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве. Сб. тезисов докладов III Международного форума, Санкт-Петербург: ГУАП, 08 ноября 2023 года – С. 54-56.

15. Зайцев, П.С. Повышение качества продукции путём цифровизации процессов производства электроники / П.С. Зайцев // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сб. статей V Международного форума, Санкт-Петербург: ГУАП, 02 марта 2023 года. – С. 223.

16. Зайцев, П.С. 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.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

17. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа контроля и анализа электронной компонентной базы для подготовки производства монтажа электронных печатных плат» / П.С. Зайцев, Г.И. Коршунов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2021660490 от 28.06.2021 г.

18. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа мониторинга радиопередающих устройств по протоколу LORAWAN на базе микросхемы MIMX8MN5CVTIZAA для базовой станции ЛКЖС.464421.010» / К.А. Брусенцов, Г.И. Коршунов, И.Г. Коршунов, А.Е. Чуписов, П.С. Зайцев // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022669584, 21.10.2022. Заявка № 2022668975 от 17.10.2022 г.

19. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа модуля контроля работы ЛКЖС.421417.002 на базе микросхемы K1986BE92QI» / Г.И. Коршунов, К.А. Брусенцов, П.С. Зайцев, А.Ю. Мячков // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022680180, 28.10.2022. Заявка № 2022668943 от 17.10.2022 г.

20. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа модуля контроля работы ЛКЖС.421417.001 на базе микросхемы ATTINY861A» / Г.И. Коршунов, К.А. Брусенцов, П.С. Зайцев, А.Ю. Мячков // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022680309, 31.10.2022. Заявка № 2022668949 от 17.10.2022.