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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Фролова Елена Александровна

Санкт-Петербург – 2025

Содержание

Введение 4

1. Текущее состояние и перспективы развития организации производственных процессов при производстве радиоэлектроники 14

1.1. Схема кооперации предприятий в цепочке производства РЭП 14

1.2. Аллокация на рынке электронной компонентной базы 15

1.3. Анализ волатильности рынка комплектующих изделий 17

1.4. Анализ цифрового цикла разработки и производства радиоэлектронной продукции 31

1.4.1 Процесс трафаретной печати 31

1.4.2 Процесс установки компонентов 39

1.4.3 Процесс оплавления 45

1.1.4 Автоматическая оптическая инспекция 50

1.5. Анализ жизненного цикла радиоэлектронной продукции 52

1.6 Результаты и выводы по разделу 1 59

2. Разработка моделей повышения качества производства радиоэлектронной продукции в условиях цифровизации производства 61

2.1. Обобщенная математическая модель процессов на основе поэтапной оценки вероятностных характеристик несоответствий 61

2.2. Модифицированная версия обобщённой математической модели оценки качества процессов 66

2.3. Рекурсивная математическая модель оценки качества процессов производства РЭП 75

2.4. Результаты и выводы по разделу 2 80

3. Методики автоматизации операций технологической подготовки раиоэлектроники 83

3.1. Методика автоматизации процессов предпроизводственной подготовки радиоэлектронной продукции 83

3.2. Методика автоматизированного формирования параметров компонентов радиоэлектронной продукции на основе интеграции с базами технологических данных 96

3.3. Методика автоматического определения параметров ЭКБ с использованием сетевых ресурсов 103

3.4. Результаты и выводы по разделу 3 106

Заключение 110

Список сокращений и условных обозначений 112

Список литературы 113

Приложение А. Код программы автоматического определения количественных технологических параметров монтажа. 127

Приложение Б. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «НПФ «Торэкс» 142

Приложение В. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ФГАОУ ВО ГУАП 143

Приложение Г. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «ПАНТЕС» 145

Приложение Д. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в АО «НИИ «Масштаб» 146

Приложение В. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ 147

Введение

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.

Возникает следующее противоречие: традиционные подходы к управлению стандартной номенклатурой радиоэлектронной компонентной базы при обеспечении качества предпроизводственных этапов жизненного цикла 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 радиоэлектронной продукции (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 (ЖЦ) 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. К таким программам можно отнести:

1. Постановление Правительства РФ «Об утверждении перечня электронной (радиоэлектронной) продукции для целей применения пониженных налоговых ставок по налогу на прибыль организаций и тарифов страховых взносов» от 22 июля 2022 года № 1310 [1].

2. Распоряжение Правительства РФ «Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года"» от 17 января 2020 года № 20-р [2].

3. Постановление Правительства РФ «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации» от 27 марта 2023 года №486. Согласно данному постановлению приоритет закупок в рамках государственных контрактов отдается отечественной технике без применения комплектующих изделий иностранного производства [3].

4. Федеральный Закон «Об особых экономических зонах в Российской Федерации» от 22 июля 2005 года №116-ФЗ. Особая экономическая зона (ОЭЗ) — это часть территории Российской Федерации, на которой действует особый режим осуществления предпринимательской деятельности, создаваемая в целях развития обрабатывающих отраслей экономики, высокотехнологичных отраслей и т.д. [4].

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», «Базовые технологии силовой

электротехники», «Технологии и программное обеспечение распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем», «Технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств».

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 [5], при котором по-прежнему сохраняется большой перечень операций, выполняемых вручную.

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.

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 диссертационного исследования:

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 обусловлена:

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 технологической подготовки производства;

г) методики определения количественных и качественных показателей технологических параметров РЭП;

д) методики автоматического поиска параметров ЭКБ в сети интернет.

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.

1. Текущее состояние и перспективы развития организации производственных процессов при производстве радиоэлектроники

1.1. Схема кооперации предприятий в цепочке производства РЭП

На сегодняшний день схема кооперации с диверсификацией производственных этапов между разными предприятиями принимает глобальный характер. За счет этого достигается экономическая выгода ввиду отсутствия необходимости специализированного кадрового состава, а также закупки и обслуживания оборудования, требуемого для конкретного этапа производства. На рисунке 1 представлена рассматриваемая в данной работе схема кооперации предприятий.

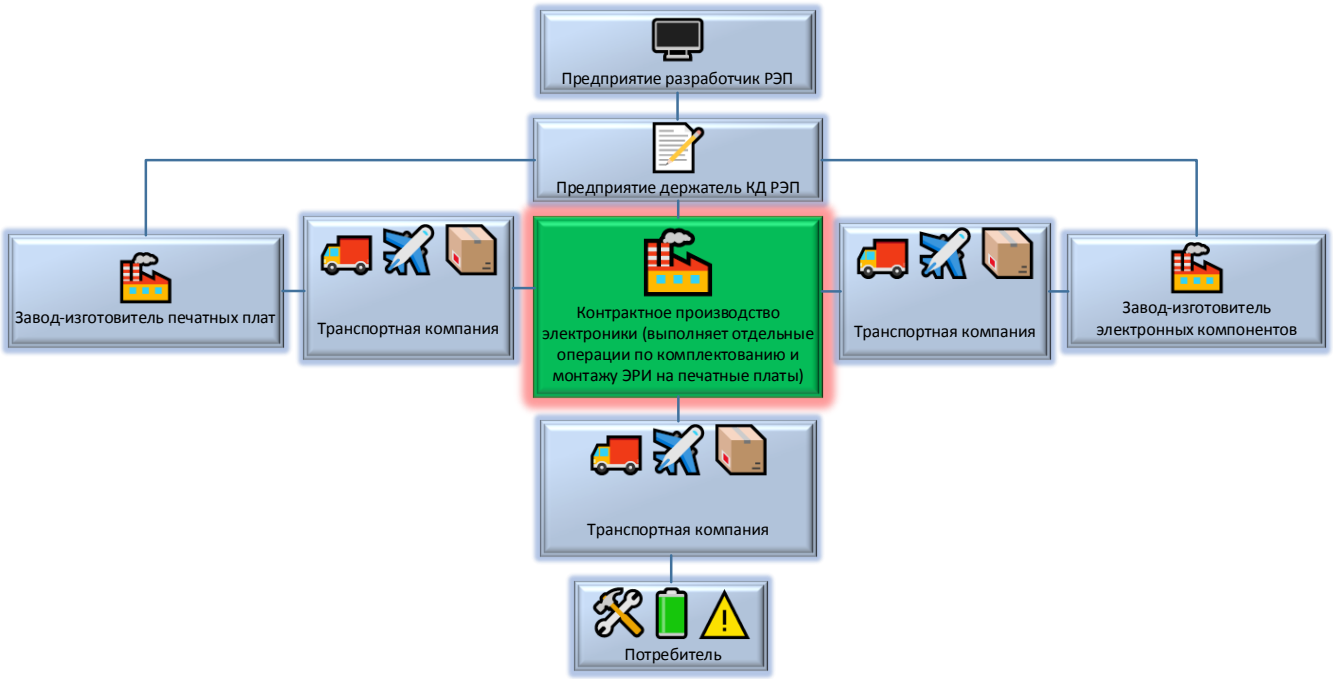

Рисунок 1 – Схема кооперации предприятий в цепочке производства РЭП

Как видно на рисунке 1, все этапы производства РЭП разнесены по разным предприятиям, таким образом, каждая компания имеет возможность развивать конкретный вид деятельности, получая от подрядчиков необходимые материалы и услуги. Качество производства РЭП для каждого участника кооперации контролируется отечественными и мировыми стандартами [6-37].

Несмотря на преимущества, описанные выше, данная схема имеет так же недостатки, связанные с тем, что контрагенты часто не обладают

необходимой информацией о специфических производственных требованиях остальных участников кооперации. Например, предприятие-разработчик РЭП, не обладая информацией по требуемым зазорам между элементами топологии, передает некорректную КД для производства остальным участникам, которые в свою рабочую документацию либо вносят корректировки своими силами по согласованию с предприятием-разработчиком, либо дожидаются выпуска новой КД. Описанный пример демонстрирует одну из возможных причин возникновения задержки цикла производства РЭП. В [38] предлагается автоматизированная система регистрации изменений КД, которая позволяет оперативно передавать информацию об изменениях внутри одного предприятия в минимально возможные сроки, однако, в современной структуре передачи информации по предприятиям-участникам кооперации подобный оперативный инструмент отсутствует.

1.2. Аллокация на рынке электронной компонентной базы

В 2019 году состояние производства РЭП в общем плане можно охарактеризовать следующим образом: устоявшийся, работоспособный состав электрорадиоизделий (ЭРИ) РЭП; планомерные закупки комплектующих по проектным ценам у заводов изготовителей.

Однако в 2020 году возникло резкое увеличение накладных расходов на доставку компонентов, что привело к следующим последствиям для производства РЭП [39]:

— Резкое удорожание ЭРИ из состава изделия, а как следствие снижение прибыли или потеря конкурентных преимуществ предприятий-держателей КД;

— Пересмотр проектных цен в сторону удорожания.

— Участились случаи поставки контрафактных и бракованных комплектующих, что сказалось как на стоимости, так и на сроках производства изделий.

Так же в 2020 году возникли техногенные происшествия на крупных фабриках по производству ЭРИ, что привело к следующим последствиям:

— Дефицит части номенклатуры, применяющейся в большом количестве РЭП из разных отраслей промышленности.

— Отсутствие проектных цен, спекулятивное ценообразование.

— Все заключенные контракты на поставку РЭП оказались под угрозой срыва из-за отсутствия основных комплектующих для производства.

Третьим событием в развитии аллокации ЭКБ в 2020 году послужил рост цен на медь и срывы сроков поставки из Перу и Чили, что так же повлияло на поставку комплектации. Начиная с 2020 года рост цен на медь составил около 40% (рисунок 2).

Рисунок 2 – График волатильности цен на медь

В 2021-2025гг. имеет место быть реструктуризация международной кооперации, приводящая к корректировке цепочек поставок электронных

компонентов, что так же негативно сказывается на политике ценообразования и сроков поставки ЭКБ.

Таким образом, к 2025 году производство РЭП характеризуется динамично меняющейся ситуацией на рынке ЭКБ, что в свою очередь приводит к необходимости непрерывного пересмотра и корректировки КД РЭП. В свою очередь реагируя на описанные события, производители электроники с учетом нарастающей неопределенности повышают вариативность изделий, постоянно организовывая оперативные внесения изменений в номенклатуру и схемотехнику РЭП.

1.3. Анализ волатильности рынка комплектующих изделий

Помимо аллокации на рынке ЭКБ ИП отечественные производители электроники столкнулись с трудностями при импорте микросхем и усложнением логистических цепочек, что привело к следующим проблемам:

1. Увеличению сроков поставки комплектующих;
2. Удорожанию номенклатуры;
3. Увеличению фактов срыва поставок.

В [40] приведены статистические данные о текущей ситуации на рынке ЭКБ.

Для анализа выбраны следующие типы ЭКБ ИП, представленные в таблице 1:

Таблица 1 – Таможенные коды для оценки импорта компонентов.

ТН ВЭД	**Расшифровка**
8532xxx*	Конденсаторы электрические постоянные, переменные или подстроечные.
8533xxx**	Резисторы электрические (включая реостаты и потенциометры)
8541xxx***	Диоды, транзисторы и аналогичные полупроводниковые приборы

Продолжение таблицы 1

ТН ВЭД	**Расшифровка**
85045xxx	Катушки индуктивности и дроссели прочие
85364xxx	Реле
8542319010	схемы интегральные монолитные (процессоры и контроллеры)
8542339000	Схемы электронные интегральные: усилители, прочие

В таблице 2 приведены данные по импорту за 2021 и 2022гг. Данные представлены в виде веса (кг) и суммы денежных средств (у.е.), уплаченных за компоненты.

Таблица 2 – Показатели импорта в денежном выражении и в весе.

Год:	**2022**		**2021**		**Соотношение**	
Код ТН ВЭД	**Сумма, у.е.**	**Вес нетто**	**Сумма, у.е.**	**Вес нетто**	**Цена 22/21**	**Вес 22/21**
Катушки индуктивности и дроссели прочие	41 343 151,00	1 345 505	44 835 554,00	1 424 688	0,92	0,94
Конденсаторы	105 121 301,00	1 467 342	99 395 049,00	1 731 217	1,06	0,85
Резисторы, реостаты и потенциометры	42 093 661,00	987 589	45 943 394,00	916 281	0,92	1,08
Реле	118 195 387,00	4 892 981	159 240 617,00	5 043 600	0,74	0,97
Диоды, транзисторы и др. полупроводниковые приборы	143 959 730,00	365 952	138 767 149,00	451 569	1,04	0,81

Продолжение таблицы 2

Год:	2022		2021		Соотношение	
Код ТН ВЭД	**Сумма, у.е.**	**Вес нетто**	**Сумма, у.е.**	**Вес нетто**	**Цена 22/21**	**Вес 22/21**
Схемы интегральные монолитные (процессоры и контроллеры)	656 609 727,00	172 947	382 969 595,00	184 997	1,71	0,93
Схемы электронные интегральные: усилители и т.д.	71 659 434,00	7 669	52 615 191,00	8 642	1,36	0,89
Общий итог	1 178 982 391,00	9 239 985	923 766 549,00	9 760 997	1,28	0,95

На графике (рисунок 3) видно, что вес импорта снизился по всем рассматриваемым таможенным кодам компонентов, за исключением резисторов, реостатов и потенциометров. Однако, в денежном выражении наблюдается значительный рост в части активных компонентов.

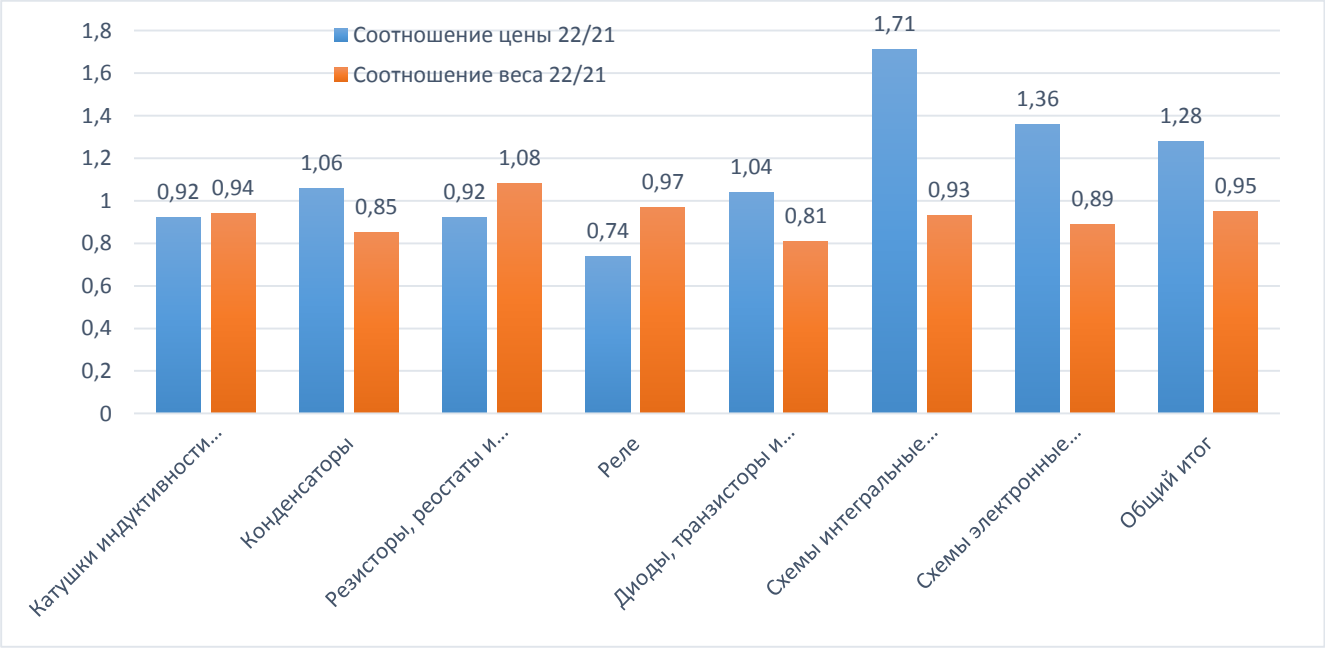

Рисунок 3 – график соотношения импорта за 2021-2022гг.

Данное расхождение можно объяснить следующими предположениями [40]:

1. Рост цен на материалы, а, следовательно, и на электронные компоненты;
2. Сохранение массовой потребности в определенных электронных компонентах и потеря проектных цен на них. Ранее заключенные контракты могли быть расторгнуты, и ввиду острой необходимости в выпуске изделий производители электроники приступили к закупке требуемых компонентов с доступных складов по спекулятивным ценам.
3. На основе п.2 – невозможность оперативного перехода на применение, например, азиатских аналогов, которые имеют лучшие цены и сроки, однако, требуют дополнительных испытаний.

В автор приводит данные для более глубокой проработки вопросов поставок импортных компонентов.

Рассмотрим первый код ТН ВЭД **8532xxx.** Данный раздел состоит из следующих таможенных кодов (типов компонентов), представленных в таблице 3.

Таблица 3 – Состав таможенного кода 8532xxx[40]

Код ТН ВЭД	**Расшифровка**
8532100000	Конденсаторы силовые
8532210000	Конденсаторы постоянной емкости танталовые

Продолжение таблицы 3

Код ТН ВЭД	**Расшифровка**
8532220000	Конденсаторы постоянной емкости алюминиевые электролитические
8532230000	Конденсаторы постоянной емкости керамические однослойные
8532240000	Конденсаторы постоянной емкости керамические многослойные.
8532250000	Конденсаторы постоянной емкости с бумажным или пластмассовым диэлектриком
8532290000	Прочие конденсаторы постоянной емкости
8532300000	Конденсаторы переменной емкости или подстроечные

В таблице 4 представлены данные по импорту всех кодов из таблицы 3.

Таблица 4 – Импорт по всем кодам из группы 8532xxx[40].

Код ТН ВЭД	**2022**		**2021**		**Соотношение**	
	Сумма в у.е.	**Вес нетто, кг**	**Сумма в у.е.**	**Вес нетто, кг**	**Цена 22/21**	**Вес 22/21**
8532100000	3 052 216,00	221 869	7 619 808,00	375 546	0,4	0,59
8532210000	16 006 606,00	9 920	11 630 426,00	12 501	1,38	0,79
8532220000	25 262 270,00	529 044	23 374 410,00	551 083	1,08	0,96
8532230000	3 608 342,00	14 148	2 631 078,00	20 384	1,37	0,69

Продолжение таблицы 4

Код ТН ВЭД	2022		2021		Соотношение	
	Сумма в у.е.	Вес нетто, кг	Сумма в у.е.	Вес нетто, кг	Цена 22/21	Вес 22/21
8532240000	37 993 588,00	102 653	34 522 104,00	128 886	1,1	0,8
8532250000	10 840 553,00	394 088	11 242 328,00	453 722	0,96	0,87
8532290000	7 037 437,00	180 473	7 210 164,00	171 878	0,98	1,05
8532300000	1 346 151,00	15 218	1 164 731,00	17 218	1,16	0,88
Общий итог	105 147 162,00	1 467 412	99 395 049,00	1 731 217	1,06	0,85

Конденсаторы преимущественно являются складскими компонентами, имеющими невысокую рыночную цену. Большинство производителей электроники закупает их с большим запасом и использует по мере необходимости.

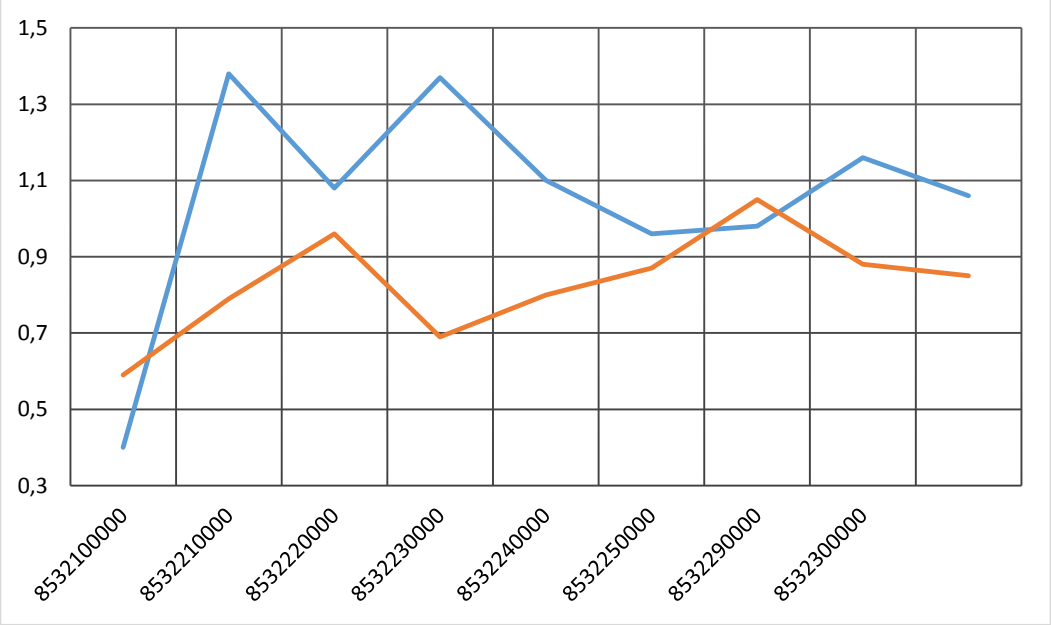

Рисунок 4 – График соотношения цены и веса за 2021г. и 2022г.

Наблюдаемое на графике (рисунок 4) расхождение цены и объема импортируемых электронных компонентов обусловлено рядом причин, включая повышение цен производителями ЭРИ на 10-15%, а также возникновением дополнительных сложностей при организации поставок. Однако, стоит отметить, что пассивные компоненты не являются ценообразующими позициями и в большинстве своем не требуют серьезных корректировок КД РЭП.

Резкое снижение объемов импорта на графике, представленном на рисунке 4 связано с временной неопределенностью на рынке чипов. Из таблицы 5 видно, что, начиная с августа 2022г., рынок чип конденсаторов стал наращивать объемы импорта в РФ.

Таблица 5 – Импорт по коду 8532ххх в Россию по месяцам [40].

2022	**Сумма, у.е.**	**% по году**
январь	10472357	10,0
февраль	9439785	9,0
март	5704819	5,4
апрель	5461043	5,2
май	7138858	6,8
июнь	7813546	7,4
июль	8063803	7,7
август	11445244	10,9
сентябрь	12924622	12,3
октябрь	12961530	12,3
ноябрь	13721554	13,0

Аналогичная конденсаторам ситуация сложилась и на рынке чип резисторов и других резистивных компонентов с таможенным кодом 8533xxx, состав которого приведен в таблице 6. Данные по импорту указанных кодов представлены в таблице 7.

Таблица 6 – Расшифровка таможенных кодов, входящих в 8533[40]

Код ТН ВЭД	**Расшифровка**
8533100000	Резисторы постоянные угольные, композитные или пленочные
8533210000	Резисторы постоянные мощностью не более 20 вт
8533290000	Прочие резисторы постоянные
8533310000	Резисторы переменные проволочные, реостаты, потенциометры не более 20 вт
8533390000	Прочие резисторы переменные проволочные, включая реостаты и потенциометры
8533401000	Резисторы переменные прочие, включая реостаты и потенциометры, не более 20 вт
8533409000	Прочие резисторы переменные, включая реостаты и потенциометры

Таблица 7 – Импорт по всем кодам из группы 8533ххх [40].

Код ТН ВЭД	2022		2021		Соотношение	
	Сумма, у.е.	Вес нетто	Сумма, у.е.	Вес нетто	22/21	22/21
8533100000	14123878	132015	13862996	143298	0,98	1,09
8533210000	6637497	62822	6973760	74907	1,05	1,19
8533290000	6762762	361174	9534624	418783	1,41	1,16
8533310000	789913	6661	1507467	12459	1,91	1,87
8533390000	1518702	168149	1192041	95814	0,78	0,57
8533401000	9270333	197699	9342377	119505	1,01	0,60
8533409000	2990576	59069	3530129	51515	1,18	0,87
Общий итог	42093661	987589	45943394	916281	1,09	0,93

Более высокая рыночная устойчивость по сравнению с другими сегментами рынка ЭКБ наблюдается у таких компонентов, как реле с кодом ТН ВЭД 85364хххх (состав кода приведен в таблице 8), данные по импорту представлены в таблице 9. В отмечено, что реле, устанавливаемое на плату, занимает одну из последних позиций с финансовой точки зрения.

Таблица 8 – Расшифровка таможенных кодов, входящих в 85364ххх [40]

Код ТН ВЭД	Расшифровка
8536411000	Реле на напряжение не более 60 в, на силу тока не более 2 а
8536419000	Реле на напряжение не более 60 в, на силу тока более 2 а
8536490000	Прочие реле, на напряжение не более 1000 в

Таблица 9 – Импорт по всем кодам из группы 85364xxx [40]

Код ТН ВЭД	2022		2021		Соотношение	
	Сумма, у.е.	Вес нетто	Сумма, у.е.	Вес нетто	22/21	22/21
8536411000	10 901 220	76 017	11 304 928	88 227	0,96	0,86
8536419000	24 647 634	623 532	39 496 741	1 084 584	0,62	0,57
8536490000	82 646 533	4 193 431	108 439 226	3 870 800	0,76	1,08
Общий итог	118 195 387	4 892 981	159 240 896	5 043 611	0,74	0,97

На основании совокупных данных можно заключить, что стоимость импорта относительно веса снизилась, предположительно по причине перехода отечественных производителей электроники на менее дорогие азиатские бренды.

Наиболее интересным сегментом рынка ЭКБ с точки зрения анализа является рынок схем интегральных 8542319010. Данные по импорту представлены в таблицах 10 и 11.

Таблица 10 – Импорт по коду 8542319010[40]

Код ТН ВЭД	2022		2021		Соотношение	
	Сумма, у.е.	Вес нетто	Сумма, у.е.	Вес нетто	22/21	22/21
8542319010	671 625 970	177 776	387 259 138	186 935	1,73	0,95

Таблица 11 – Импорт по месяцам по коду 8542319010[40]

Дата	2022		2021	
	Сумма, у.е.	**Вес нетто**	**Сумма, у.е.**	**Вес нетто**
январь	40 224 316,00	18 948	30 709 145,00	13 612
февраль	38 439 813,00	20 192	25 431 771,00	14 929
март	18 621 210,00	6 287	29 349 466,00	17 246
апрель	19 096 929,00	4 335	34 380 615,00	18 676
май	48 729 316,00	10 542	37 315 256,00	18 738
июнь	57 643 178,00	8 857	29 119 956,00	17 954
июль	81 000 573,00	15 330	35 120 506,00	17 314
август	83 209 920,00	18 264	38 388 065,00	19 120
сентябрь	92 343 012,00	27 173	37 049 734,00	15 523
октябрь	102 176 658,00	24 395	43 022 467,00	15 409
ноябрь	90 141 044,00	23 453	47 372 156,00	18 413
Общий итог	671 625 970,00	177 776	387 259 138,00	186 935

В 2021г. грузы в РФ поступали равномерно по устоявшимся каналам поставки, однако, в 2022г. многие каналы поставок стали недоступными для отечественных производителей. В связи с этим наблюдается резкое сокращение объемов импортных комплектующих, ввозимых на территорию РФ, с марта по июнь 2022г. В июле поставщики ЭКБ завершили перестройку каналов поставки и смогли наверстать неудовлетворенный спрос на микросхемы.

Для более подробного анализа в [40] приводятся данные по импорту разных брендов микросхем (таблица 12).

Таблица 12 – Импорт брендов, которые известны на компонентном рынке, по коду 8542319010 [40]

Изготовитель	2022		2021		Соотношение	
	Сумма, у.е.	Вес нетто	Сумма, у.е.	Вес нетто	22/21	22/21
INTEL	298 842 656	83 446	124 592 331	71 216	2,4	1,17
AMD	48 651 306	21 053	35 501 092	31 313	1,37	0,67
STM	39 329 022	6 753	30 829 314	9 047	1,28	0,75
Microchip/Atmel	40 078 967	7 846	24 036 374	9 071	1,67	0,86
TEXAS	21 680 378	3 981	15 059 918	5 601	1,44	0,71
NXP/Freescale	13 725 314	3 209	12 163 717	6 818	1,13	0,47
AD/MAXIM	14 201 361	1 013	6 271 331	1 165	2,26	0,87
INFINEON/IR	7 178 816	1 426	9 566 828	3 663	0,75	0,39
SAMSUNG	1 615 095	291	9 244 735	1 427	0,17	0,2
BROADCOM/ AVAGO	6 697 388	248	2 016 413	322	3,32	0,77
ALTERA	3 834 566	377	539 928	139	7,1	2,72
SILICON	2 002 681	239	1 382 632	436	1,45	0,55
XILINX INC	1 453 851	23	1 486 209	34	0,98	0,67
Renesas/IDT	1 905 866	596	576 537	346	3,31	1,72
CYPRESS	1 601 505	180	848 22	364	1,89	0,49

В статье [40] описан пример: один из производителей электроники в своих изделиях использует микроконтроллер (МК) ф. Microchip, который ранее закупался непосредственно у производителей по контрактным ценам. Однако, в условиях дефицита данная возможность была утеряна в 2022г. У обозначенного производителя остался один возможный вариант: осуществлять закупки по спекулятивным ценам с учетом новых реалий рынка ЭКБ.

В мире уже на сегодняшний день есть более привлекательные аналоги с точки зрения сроков поставки и экономической составляющей, однако, их

применение приведет к изменению схемы изделия и его программного обеспечения, что повлечет за собой необходимость проведения дополнительных работ по НИОКР. В текущий момент, не располагая достаточными возможностями, либо имея низкий лимит доверия к аналогам производитель решил и далее применять проблемный компонент, а корректировку КД РЭП оставить на будущее.

Статистика по остальным таможенным кодам сходится с приведенными выше разделами, поэтому не включена в данную работу. Одновременно с этим, в работе отсутствуют последующие данные по импорту ЭКБ по причине того, что с конца 2022г. Федеральная таможенная служба не публикует экспортную и импортную отчетность.

Для более подробного анализа в рамках данной работы рассмотрены цены на конкретные микросхемы иностранного производства (данные приведены в таблице №13)

Таблица №13 – Анализ цен ЭКБ [40].

Наименование	**Цена в 2019 в у.е. (до дефицита)**		**Цена в 2021–2022 в у.е. (пик аллокации)**		**Цена в 2023–2024 в у.е.**		**Рост (макс.)**
	Мин.	**Макс.**	**Мин.**	**Макс.**	**Мин.**	**Макс.**	
STM32F103C8T6	0,80	1,20	8	15	3	5	18,75
ATmega328P	1,50	2	12	20	4	6	13,33
Micron MT40A1G8 (DRAM)	3	4	18	30	10	12	10,00
IRF3205 (MOSFET)	0,30	0,50	2,50	4	1	1,50	13,33
LM358 (Op-Amp)	0,10	0,20	0,80	1,50	0,30	0,50	15,00

Подводя итог данного раздела, можно с уверенностью сказать, что на текущий момент рынок ЭКБ РФ находится в переходном периоде. Многие годы до настоящего времени подавляющее большинство отечественных

производителей электроники были ориентированы на импортную элементную базу. Однако, с наступлением описанных в разделах 1.2 и 1.3 условий, отечественные производители будут проводить изменения в своих изделиях с целью повышения вариативности или перевода изделий на компоненты-аналоги [41-43].

В статье [40] высказывается мнение, что через 2-3 года на отечественном рынке ЭКБ будет преимущественно преобладать комплектация, производимая на азиатских заводах.

Результаты и выводы по разделу 1.3:

1. Поставка всей ранее использовавшейся номенклатуры на текущий момент возможна. Однако, имеются следующие трудности:

— Невозможно гарантировать срок поставки, а также высок риск срыва поставки

— Наличие спекулятивных цен на ряд номенклатур;

— Ввиду обозначенных выше проблем появляется необходимость наличия запасов дорогостоящих компонентов на складах производителей

2. В зависимости от класса ЭКБ наблюдается 10-30%-ый рост на отпускную цену. Отсутствие проектных цен, дефицит предложения на рынке.

3. На основе представленной статистики в денежном выражении рынок ЭКБ вырос на 15-25%, однако, при сравнении с количественными показателями объема рынка, он сократился на 10-15%.

Представленная аналитика не дает точного понимания положения дел на рынке ЭКБ, поскольку в рамках рассматриваемых таможенных кодов есть определенное количество частных случаев, которые могут весьма сильно изменить денежные и количественные показатели рынка. Однако, фокусные данные приведенные в таблице 13 подтверждают итоговые результаты обобщенного анализа в рамках кодов ТН ВЭД.

Дополнительно стоит отметить, что серийные производители электроники, обладающие большими запасами финансовых средств, вероятно, сформировали достаточные запасы для того, чтобы не испытывать потребность

в ЭКБ на протяжении 1-2 лет. Отсутствие их участия при формировании спроса может так же сказаться на конечных данных. Однако, даже с учетом вышесказанного, можно сформировать общее понимание картины на рынке ЭКБ ИП.

1.4. Анализ цифрового цикла разработки и производства радиоэлектронной продукции

1.4.1 Процесс трафаретной печати

Одним из этапов производства электроники является нанесение паяльной пасты на печатную плату. Существует два часто применяющихся метода осуществления данного этапа: дозирование [44] и трафаретная печать [45-46].

В работе будет рассмотрен метод трафаретной печати, получивший широкое применение в серийном и крупносерийном производстве, благодаря его высокой производительности и повторяемости.

В современном мире производители электроники имеют необходимость в сокращении времени производства партии и времени переналадки линии под другой заказ.

На серийном производстве процесс подачи печатной платы в автоматический принтер трафаретной печати автоматизирован и выполняется при помощи конвейера, однако, в некоторых принтерах есть возможность ручной загрузки плат.

Основные элементы автоматического принтера трафаретной печати (используются, например, в модели GSD-PM1200L):

1) Автоматическая система очистки (рисунок 5);

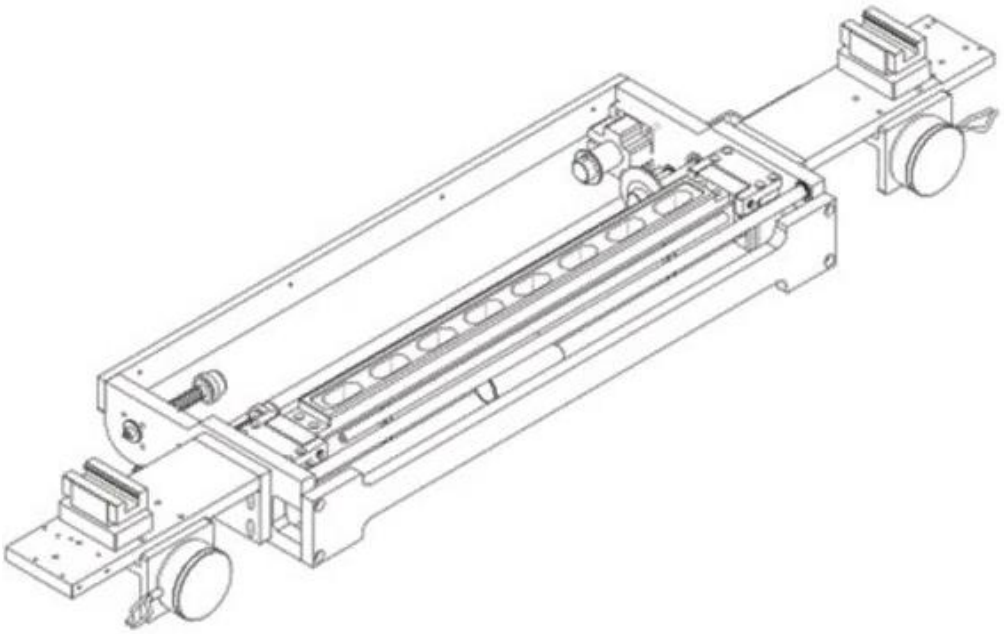

Рисунок 5 – Автоматическая система очистки

2) Подвесная ракельная система (рисунок 6);

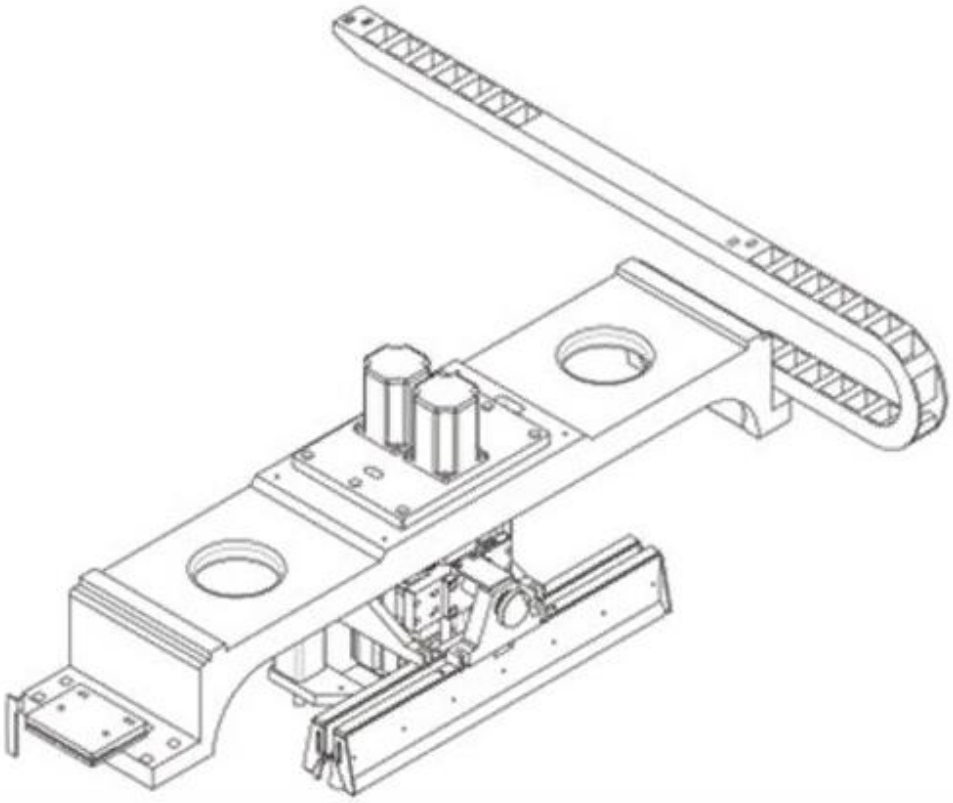

Рисунок 6 – Подвесная ракельная система

3) Корректировочная платформа (рисунок 7);

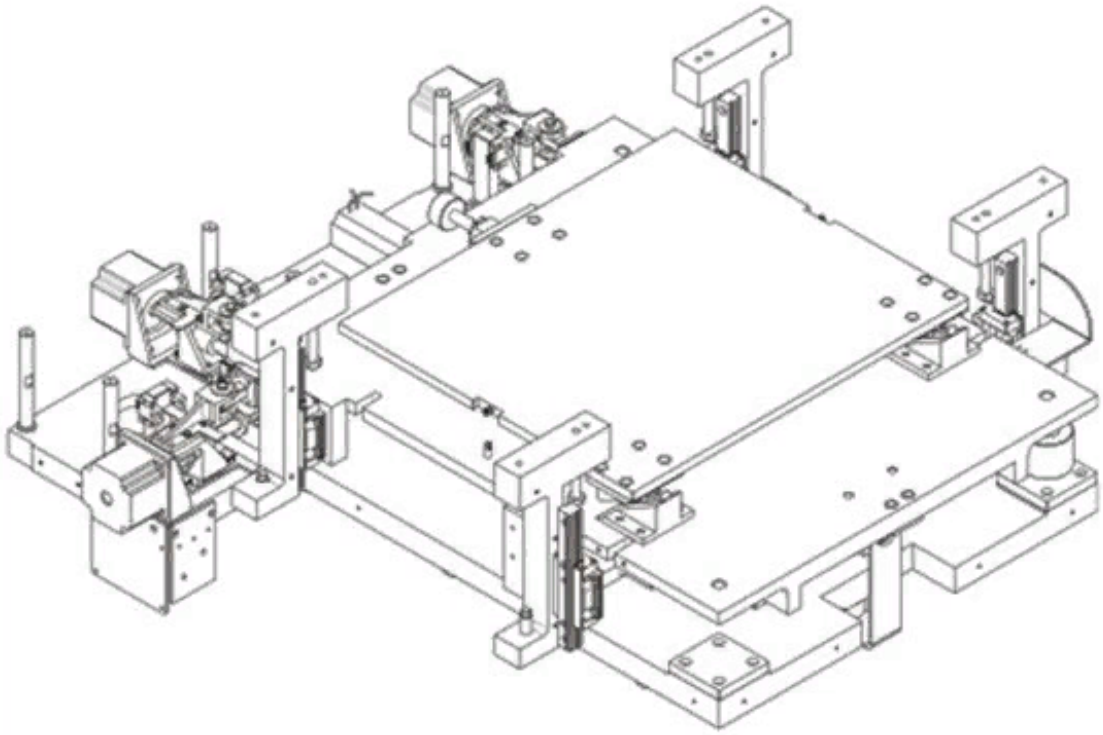

Рисунок 7 – Корректирующая платформа

4) Подъемный механизм (рисунок 8);

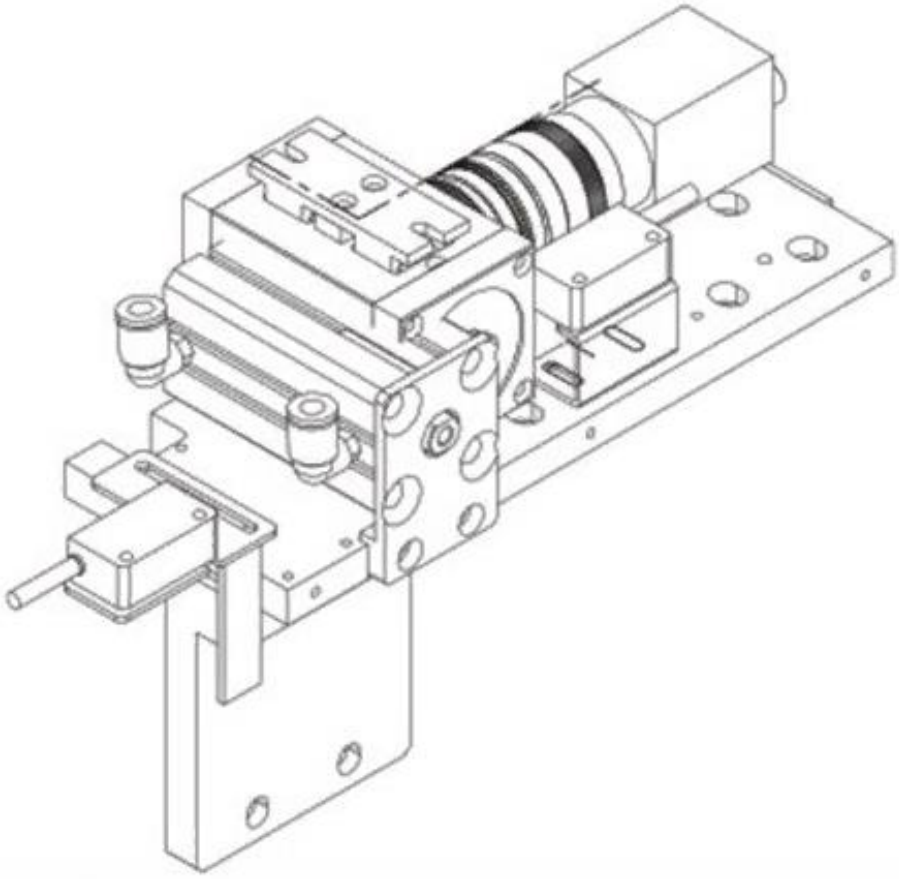

Рисунок 8 – Подъемный механизм

5) Прижимная система (рисунок 9);

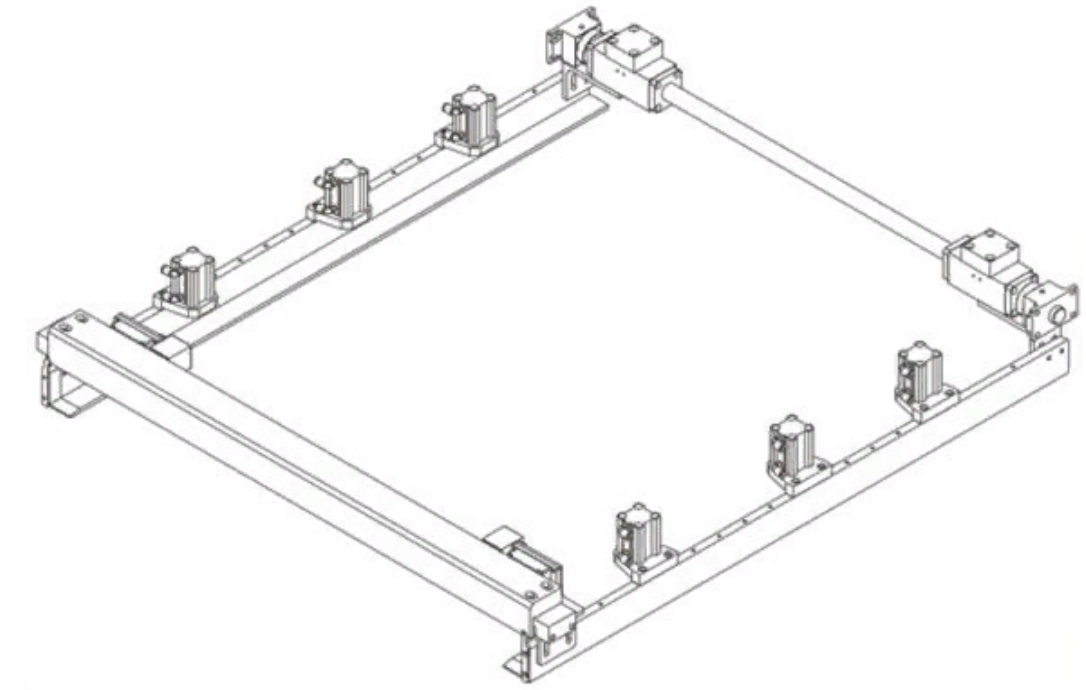

Рисунок 9 – Прижимная система

6) Направляющие (рисунок 10);

Рисунок 10 - Направляющие

Общая схема конструкции представлена на рисунке 11.

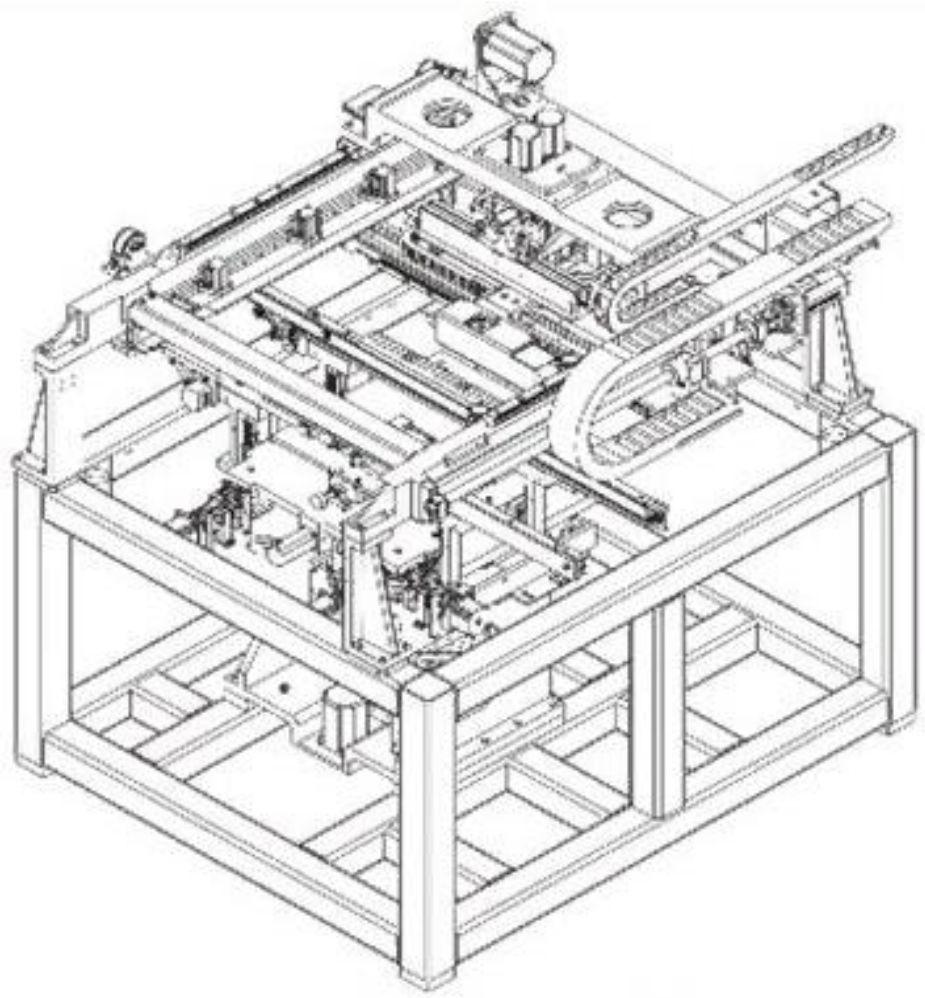

Рисунок 11 - Общая схема конструкции

Дополнительным модулем в автоматическом принтере трафаретной печати может быть встроенная 2D-инспекции паяльной пасты. Однако данное решение затормаживает процесс производства РЭП, так как нет возможности загрузить следующую плату до того момента, пока не закончится оптический контроль предыдущей. Но не смотря на данный недостаток, встроенная 2D-инспекция позволяет сократить затраты на оборудование, так как не требует приобретения отдельной установки в линии. Так же важным преимуществом данного решения является экономия места на производстве. Учитывая преимущества данного решения производителям электроники выгоднее использовать на производстве автоматические принтеры трафаретной печати со встроенной 2D-инспекцией.

Сама технология трафаретной печати заключается в следующем:

1) Сначала ПП загружают в принтер посредством конвейера, либо

ручным способом (рисунок 12);

Рисунок 12 – Загрузка ПП

2) Затем осуществляется прижим ракеля и трафарета к ПП Рисунок 13);

Рисунок 13 – Прижим ракеля и трафарета к ПП

3) Выполняется нанесение паяльной пасты. На данном этапе осуществляется плавное, равномерное движение ракеля по поверхности трафарета (рисунок 14). В ходе своего движения ракель вдавливает паяльную пасту в апертуры (отверстия на трафарете для нанесения пасты на контактные площадки);

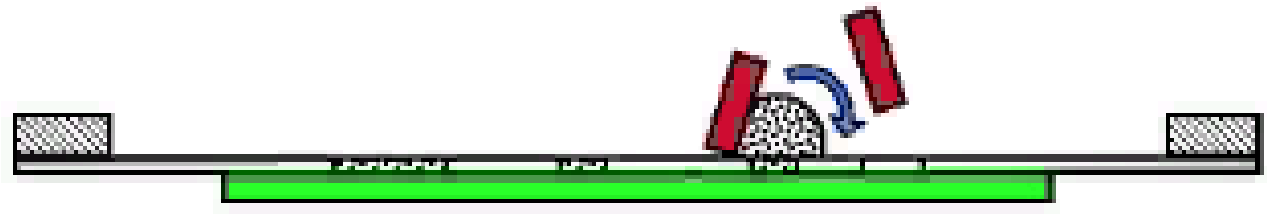

Рисунок 14 – Нанесение паяльной пасты

4) Поднятие ракеля и трафарета (рисунок 15);

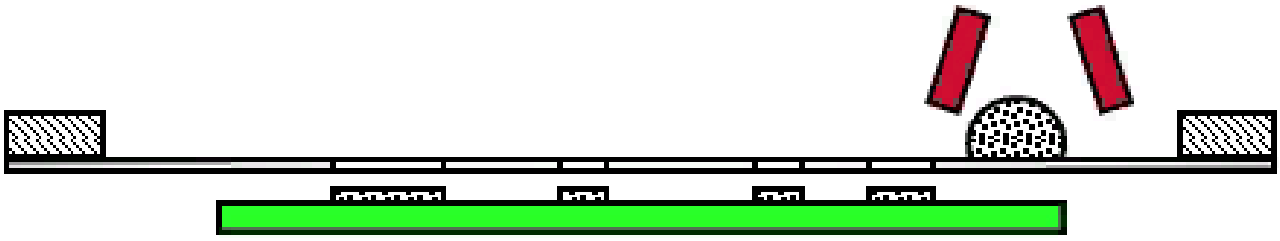

Рисунок 15 – Поднятие ракеля и трафарета

После завершения указанных этапов в принтер поступает следующая ПП и действия повторяются.

Технологические параметры трафаретной печати:

1. усилие прижима ракеля к трафарету;
2. скорость движения ракеля;
3. зазор между трафаретом и ПП;
4. угол наклона ракеля;
5. твердость ракеля;
6. температура.

На рисунке 16 представлены силы, действующие на ракель.

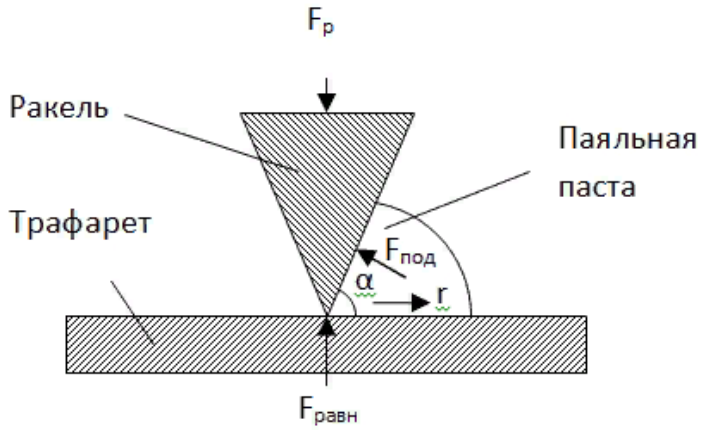

Рисунок 16 – Силы действующие на ракель и трафарет в процессе нанесения пасты

С физической точки зрения процесс нанесения паяльной пасты описывается законами гидромеханики [45-46]. Паяльная паста при проходе ракеля под воздействием гидродинамической силы продавливается через апертуры. Данная сила действует на трафарет и на ракель, что приводит к возникновению подъемной силы $F_{под}$. Равнодействующая сила $F_{равн}$ является результатом воздействия подъемной силы и усилия ракеля $F_р$. Равнодействующая сила описывается следующим образом (1):

$$F_{равн} = F_р - F_{под} cos\alpha \quad (1)$$

Давление гидродинамической силы пасты $P_п$ на ракель создает подъемную силу (2).

$$P_п \approx \frac{\eta V f(\alpha)}{r} \quad (2)$$

Из этого следует (3):

$$F_{\text{под}} = \eta V f(Q) f(\alpha) \quad (3)$$

де η – вязкость пасты;

V – скорость движения ракеля;

r – ширина области контакта валика пасты с трафаретом;

α – угол наклона ракеля;

f(α) – геометрическая функция α (значение которой уменьшается с 5 при α=60° до 4 при α=70°);

f(Q) – функция, зависящая от количества пасты перед ракелем (значение которой увеличивается при повышении количества пасты).

Критерий оценки качества трафаретной печати – очистка верхней поверхности трафарета от пасты при проходе ракеля.

Рассмотрим вышеуказанные параметры технологического процесса нанесения паяльной пасты.

Усилие. Процесс нанесения пасты напрямую зависит от данного параметра. Стандартной рекомендацией является соотношение 1кг/100мм длины ракеля при скорости 10 мм/с. Чаще всего технологи начинают подбор непосредственно с этих значений. Соответственно при увеличении скорости в 2 раза стоит удвоить усилие.

Скорость и усилие ракеля подбирают так, чтобы поверхность трафарета полностью очищалась от пасты. В случае, если усилие недостаточное, паста будет оставаться на трафарете, если наоборот чрезмерное, будет происходить вычерпывание пасты и образование перемычек.

Скорость движения ракеля. Скорость прохода ракеля напрямую зависит от вязкости пасты. Чем больше вязкость, тем меньше скорость ракеля и наоборот. Скорость прохода ракеля зачастую находится в интервале 12-50 мм/с.

При выборе скорости ракеля важно помнить, что при уменьшении скорости прохода ракеля увеличивается давление на пасту и наоборот. Таким образом, изменение скорости ракеля предполагает изменение его усилия.

В настоящее время в промышленности используются пасты, которые за малое количество времени способны вернуть вязкость в первоначальное значение. Пасты такого типа зачастую используются при нанесении пасты под элементы с шагом 0,5 мм со скоростью 100 мм/с.

Твердость ракеля. Твердость ракелей немаловажный параметр, влияющий на качество технологического процесса, ее определяют с помощью метода Шора. Различают три типа твердости ракелей:

— мягкий, с твердостью 65 единиц;

— средний, с твердостью 75 единиц;

— жесткий, с твердостью 90 единиц.

Для ступенчатых трафаретов используют ракель средней жесткости, для трафаретов с фиксированной толщиной – жесткий ракель.

Наиболее широко используются металлические ракели, так как они обеспечивают хорошую управляемость технологическим процессом. Металлические ракели имеют большой срок службы, также современные ракели имеют разнообразные формы и наклоны, что также увеличивает возможность контроля технологического процесса.

1.4.2 Процесс установки компонентов

Следующим этапом после нанесения паяльной пасты и ее инспекции идет установка компонентов. В серийном производстве используются автоматы установки компонентов (АУК), которые работают самостоятельно без участия человека. Оператору требуется лишь установить питатели. В линии участвуют две такие установки:

1) автомат для маленьких компонентов;
2) автомат для крупных компонентов.

На каждой печатной плате, попадающей в автомат установки компонентов, обязательно должны быть реперные знаки. Когда печатная плата фиксируется в установщике, последний с помощью камеры считывает реперные знаки для определения местоположения ПП.

Не существует ни одного идеального процесса: в результате каждого действия появляются различные погрешности. Данное обстоятельство необходимо учитывать при установке компонентов, поскольку на предыдущих этапах могли произойти различные отклонения от нормы. Эти отклонения выявляются и принимаются во внимание с помощью специальных загруженных в установщик алгоритмов. С помощью трех реперных знаков автомат установки компонентов может скорректировать погрешности ортогональности – наклон осей. Погрешности, связанные с нелинейными искажениями фотошаблона, корректируются при помощи 4 реперных знаков.

После определения местоположения печатной платы начинается установка компонентов. С помощью вакуумных зажимов автомат установки захватывает компоненты из питателей и переносит их на ранее заданное место. В современных автоматах имеются несколько зажимов, работающих одновременно, для увеличения производительности. Стоит отметить, что при захвате компонента АУК производит операции по снижению погрешности захвата. Зажимы не могут взять компонент точно по центру. Раньше в автоматах установки использовались механические центрирующие механизмы. Со временем производители АУК отказались от данного вида устранения погрешностей при захвате и стали использовать различные оптические системы центрирования. Данный метод позволяет сэкономить время путем устранения действий по механическому воздействию на компоненты. Взамен этого АУК регистрирует отклонение от центра и учитывает его при установке на плату.

Основные параметры АУК [47]:

1. производительность;
2. точность;
3. повторяемость;
4. количество позиций под питатели;
5. номенклатура устанавливаемых компонентов;
6. максимальные и минимальные габаритные размеры ПП.

Стоит пояснить некоторые из вышеупомянутых характеристик. Повторяемость определяется опытным путем: на тестовую плату устанавливают компонент, затем измеряется смещение установки компонента. После чего компонент убирают с ПП и устанавливают снова, при этом измеряя смещение. Данный параметр является недостаточно информативным, так как при его использовании не учитывается влияние местоположения компонента на всей площади платы.

Точность дает более подробную информацию об АУК. При нахождении точности автомата на тестовую плату в разные места устанавливают стандартные компоненты и высчитывают смещение каждого из них.

Так как точность установки компонентов учитывает влияние всех характеристик процессов, то разберемся более подробно в том, как высчитывается данная величина и то, как с помощью нее определить, какой из представленных на рынке АУК лучше.

При нахождении величины точности установщика необходимо учитывать, что ошибки установки могут быть случайными и систематическими. Систематические можно устранить с помощью калибровки АУК, в результате будут устранены причины неточности, которые зависят от самой установки.

Случайная ошибка [47] – величина, на которую оказывает влияние большое количество независящих друг от друга факторов. Как известно, если на величину влияние оказывают слабо зависящие друг от друга факторы, то распределение центрированного и нормированного результата данной величины стремится к нормальному.

Функция плотности нормального распределения (4):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

На рисунке 17 приведено графическое изображение нормального распределения.

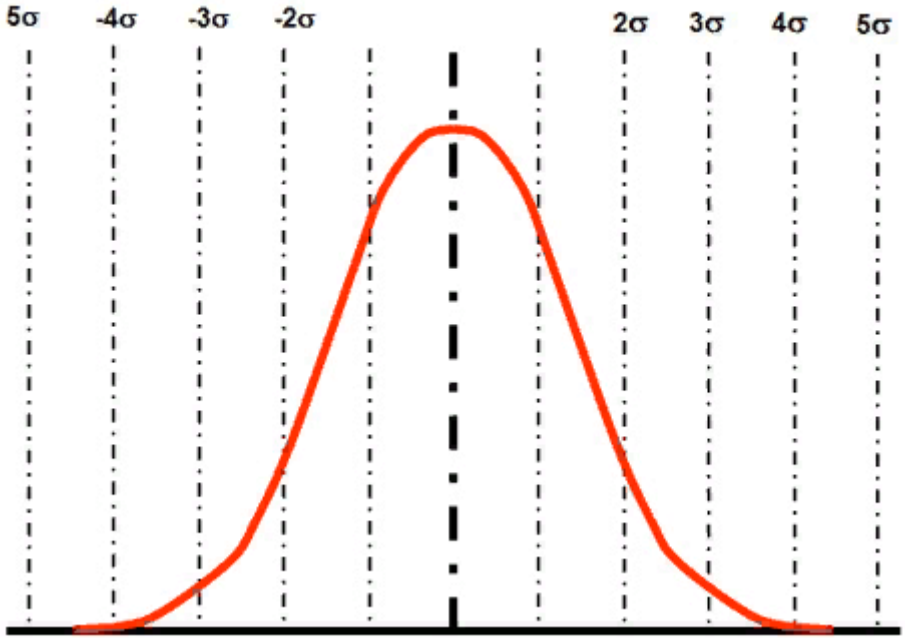

Рисунок 17 – Графическое отображение функции плотности нормального распределения

Математическое ожидание (среднее значение μ) и среднеквадратическое отклонение характеризуют функцию плотности нормального распределения. Среднеквадратическое отклонение (СКО) определяет рассеяние случайной величины относительно среднего значения.

На рисунке 17 видно, что наибольшая вероятность попадания в интервал соответствует интервалу равному 6 сигм.

Привязка к сигмам является необходимым условием для определения точности установщика, так как она дает возможность оценить, с какой вероятностью смещение компонента выйдет за допустимые пределы.

Существуют коэффициенты C_p и $C_{pк}$, которые рассчитываются с целью оценки, насколько АУК в реальных условиях производства способен устанавливать компоненты. Данные коэффициенты показывают, насколько процесс воспроизводим.

Коэффициент C_p является отношением допустимых отклонений к естественному разбросу, определяемому как 6 сигм (±3σ) (5).

$$C_p = \frac{\text{верхнее отклонение} - \text{нижнее отклонение}}{6\sigma} \qquad (5)$$

Графическое представление коэффициента C_p представлено на рисунке 18.

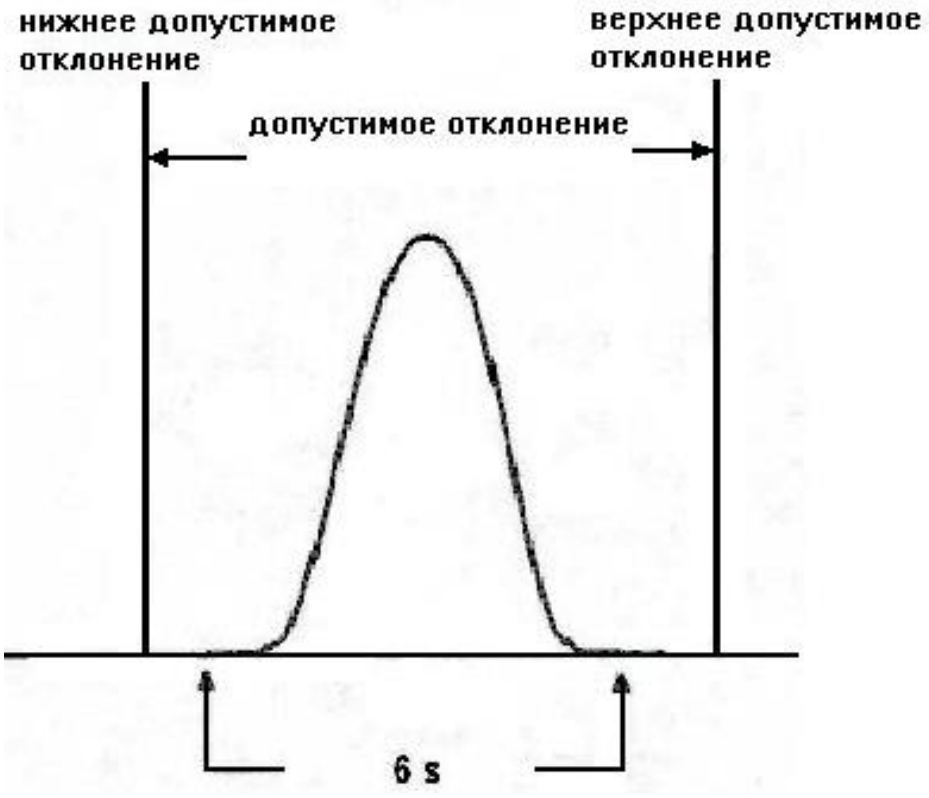

Рисунок 18 – Графическое представление коэффициента C_p

При значении C_p=1,0 процесс признается воспроизводимым. Однако на практике процесс считают воспроизводимым, если C_p=1,33. Это необходимо для того, чтобы в результате работы и воздействия на АУК внешних факторов сохранилось значение близкое к 1,0.

Коэффициент C_p используется относительно редко, потому что он не учитывает положение среднего значения. Таким образом, даже при высоком значении C_p можно получить большое количество выходов за пределы допуска, если среднее значение расположено близко к заданным границам.

В отличие от C_p коэффициент $C_{рк}$ учитывает положение среднего, рассчитывается он следующим образом (6):

$$C_{рк} = min\left\{\frac{\text{верхнее отклонение} - \mu}{3\sigma} - \frac{\mu - \text{нижнее отклонение}}{3\sigma}\right\} \quad (6)$$

Как и в случае с коэффициентом C_p, работоспособным процесс признается, если $C_{рк}$=1,33.

В 2002 году был выпущен стандарт IPC 9850. Данный стандарт был предназначен для того, чтобы установить единые правила оценивания параметров АУК. Необходимость в этом возникла из-за того, что каждый производитель оценивал АУК по методике, которую разработал сам. Отличались не только методики оценки, что доставляло еще больше неудобства в сравнении разных АУК. Ведь на точность и повторяемость влияют так же материалы, форма и размеры компонента и ПП. Из этого следует вывод, что для сравнения установок разных компаний приходилось затрачивать много времени.

В стандарте IPC 9850 указывается, что для проведения оценки АУК должны использоваться следующие компоненты:

1) конденсаторы типоразмера 0603;
2) SOIC-16;
3) QFP-100;
4) QPF-208;
5) BGA-228.

При проведении оценки компоненты устанавливаются на стеклянные платы. Выбор материала тестовой платы объясняется тем, что стекло менее подвержено деформации относительно стеклотекстолита, также выбор данного материала позволяет использовать метод проходящего света в оптических микроскопах для определения точности установки компонента.

Стоит отметить, что согласно стандарту, производительность автомата рассчитывается с учетом времени всех процессов (рисунок 19).

Рисунок 19 – Временные интервалы процессов АУК

Для оценки точности АУК используются средства измерения более точные, нежели желаемая точность АУК.

В стандарте приведены два метода оценки точности АУК:

1) необходимо провести расчёт допустимых отклонений относительно осей *x*,*y* и угла θ при c_{pk}=1,33 и c_{pk}=2,0. Данный метод учитывает случайную и систематическую погрешности;

2) второй метод рассчитывает $C_{рк}$ для четко установленных границ, у которых перекрытие контактной площадки выводом составляет 50% и 75%. Указанные величины перекрытия выбираются по предельно допустимым смещениям для изделий электроники класса 1,2 (перекрытие 50%) и класса 3 (перекрытие 75%). В отличие от первого метода, при использовании второго варианта оценки точности, возможно учесть совместное влияние ошибок по всем осям.

Помимо вышеперечисленных методов может применяться оценка АУК путем указания ошибок отдельно для каждой оси.

1.4.3 Процесс оплавления

После установки компонентов следует этап оплавления. Существует два распространенных способа пайки: в паровой фазе и конвекционная.

Конвекционная пайка бывает двух видов: камерная и конвейерная [48]. В первом случае плату помещают в камеру и постепенно изменяют температуру. Во втором ПП проходит по конвейеру несколько областей с разной температурой (рисунки 20, 21).

Как показано на рисунке 20 ПП проходят через следующие зоны:

— preheat zone – зоны предварительного нагрева и стабилизации (зоны температурного выравнивания);

— peak zone – зона оплавления;

— cooling zone – зона охлаждения.

Рисунок 20 – Конвейерная печь конвекционного оплавления в разрезе с указанием температурных зон

На рисунке 21 представлена конвекционная печь оплавления.

Рисунок 21 – Вид печи конвекционного оплавления

Факторы, влияющие на температурный профиль пайки:

— паяльная паста;

— технологическое оборудование;

— компоненты;

— печатные платы.

Стадия предварительного нагрева. Данная стадия снижает тепловой удар по компонентам и ПП. В процессе предварительного нагрева растворитель испаряется из паяльной пасты. Температура на этом этапе лежит в интервале от 95-130°С, при скорости нагрева 0,6-4,0 °С/сек. Необходимо правильно

подобрать скорость изменения температуры, так как могут возникнуть различные дефекты. Если скорость меньше требуемой, то возможно окисление припоя и контактных площадок. Если выше требуемой, то возможно образование перемычек, шариков припоя и повреждение компонентов.

Стадия стабилизации. На данном этапе оплавления активируется флюсующая составляющая жидкости и удаляется жидкость из паяльной пасты. Описываемая стадия характеризуется медленным изменением температуры. При 150°С достигается максимальная активация флюса. Обычно процесс занимает 30-180 сек. Конечная температура процесса варьируется от 150 до 170°С.

Стадия оплавления. Температура данного процесса не должна превышать температуру точки плавления пасты на 30-40°С, в противном случае возникает риск чрезмерного роста интерметаллического соединения. Низкая температура может привести к плохой смачиваемости. Стандартная скорость повышения температуры на стадии оплавления 2-4°С. Для стандартных плат время выше точки плавления 30-60 сек. Время может быть увеличено до 90-120 сек. для массивных плат. Несоблюдение данных параметров приведет к чрезмерному росту интерметаллического соединения, что ухудшит прочность соединения и его внешний вид.

Стадия охлаждения. Данный процесс необходим для обеспечения максимальной прочности. Как и на предыдущих этапах необходимо обеспечить соблюдение температурного режима. Если скорость охлаждения будет выше допустимой, это вызовет термоудар по электронным компонентам. Медленная же скорость приведет к росту интерметаллического соединения. Рекомендуемая скорость охлаждения 3-4°С/сек. до температуры ниже 130°С. Далее скорость можно уменьшить, т.к. она уже не может повлиять на прочность паяных соединений и компонентов.

Пайка в паровой фазе является альтернативным методом оплавления. В резервуаре с помощью нагревательных элементов доводят до кипения

теплоноситель, который имеет подходящую для процесса температуру кипения. Далее в паровой фазе теплоносителя происходит оплавление.

Пайка в паровой фазе состоит из 5 этапов [49]:

1) Пар формирует над поверхностью теплоносителя плотное облако (рисунок 22). Пар не улетучивается благодаря тому, что он в 20 раз тяжелее воздуха;

Рисунок 22 – Формирование парового облака

2) Погружение и нагрев сборки в паровом облаке (рисунок 23). На данном этапе инертным фторуглеродным паром вытесняется воздух.

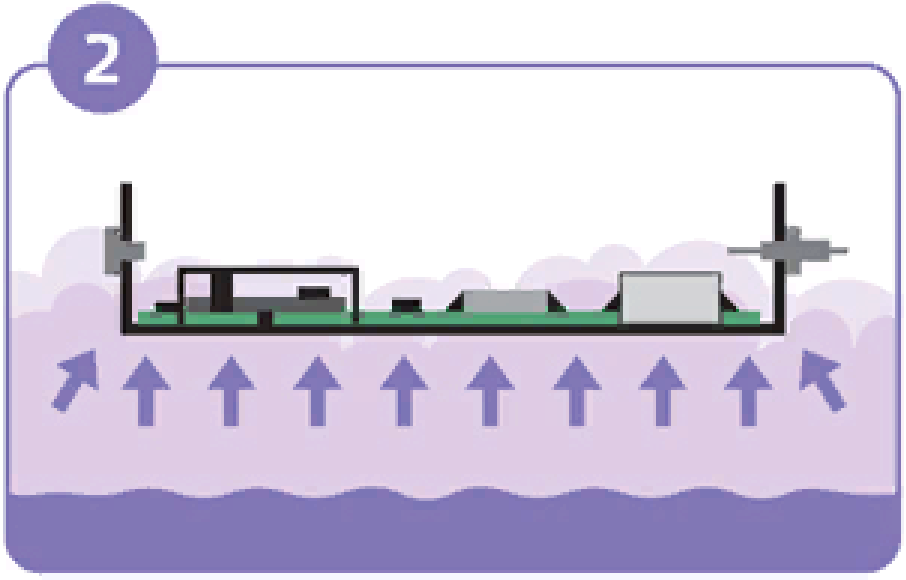

Рисунок 23 – Погружение и нагрев сборки

3) Передача энергии пара сборке за счет конденсации на её поверхности

(рисунок 24). Сборка на этом этапе полностью покрыта паром;

Рисунок 24 – Передача энергии сборке

4) Нагревание сборки до температуры насыщенного пара. После достижения заданной температуры рост прекращается (рисунок 25). На описываемом этапе происходит образование защитной инертной атмосферы;

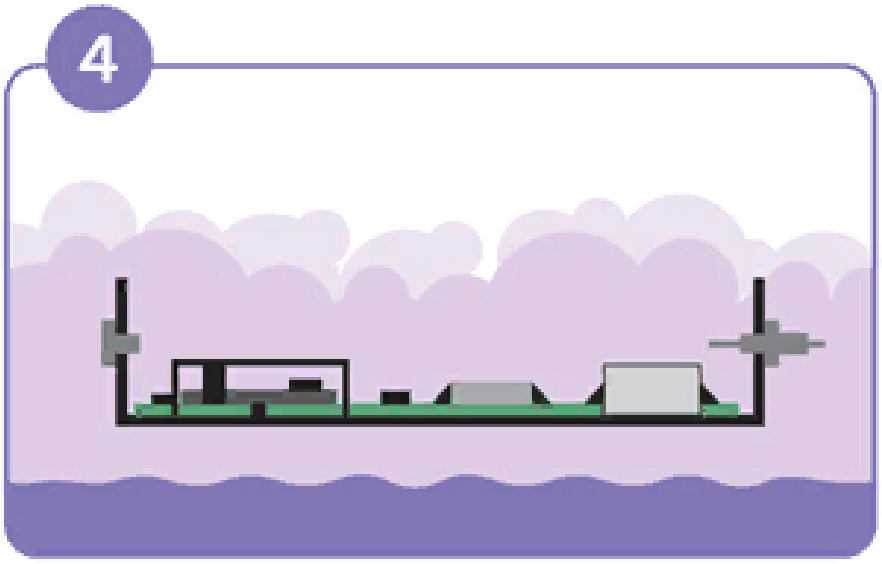

Рисунок 25 – Нагревание сборки

5) На данном этапе происходит непосредственно процесс пайки (рисунок 26). Для обычных сборок время процесса 5-6 сек., для массивных до 50 сек. Далее сборка выходит из паровой фазы, сконденсировавшаяся жидкость испаряется под воздействием теплоты сборки.

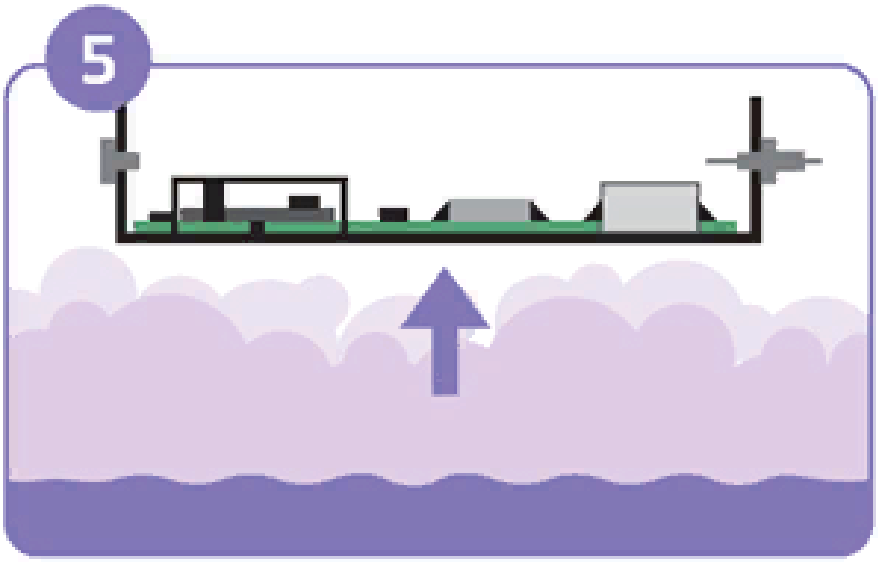

Рисунок 26 – Процесс пайки

1.1.4 Автоматическая оптическая инспекция

На каждом вышеперечисленном этапе могут возникнуть дефекты, характерные для конкретного процесса.

Возможные дефекты на этапе нанесения паяльной пасты:

— недостаточное или избыточное количество пасты на контактных площадках;

— смещение пасты относительно контактных площадок;

— перемычки;

— смазывание отпечатков пасты.

Возможные дефекты на этапе установки компонентов:

— не установленный компонент;

— смещение компонента по осям (x,y и угла θ);

— неверная полярность компонента;

— перевернутый резистор;

— неверный номинал компонента.

Возможные дефекты на этапе оплавления:

— недостаток/избыток припоя;

— неправильное формирование галтели;

— Billboard (компонент на ребре);

— Tombstone (эффект надгробного камня);

— приподнятый вывод микросхемы.

Заключительным этапом производства электроники является автоматическая оптическая инспекция (АОИ). Установку АОИ можно встраивать в линию после каждого этапа:

1) после нанесения паяльной пасты – solder paste inspection;
2) после установки компонентов – pre-reflow inspection;
3) после печи оплавления – post-reflow inspection.

На первых двух этапах установки оптической инспекции встраиваются в линию с целью предупредить появление дефектов. На заключительном этапе АОИ по факту обнаружения дефекта информирует оператора о бракованной сборке. Для максимального процента снижения количества дефектов необходимо устанавливать систему АОИ после каждого этапа, однако, это требует больших инвестиций.

В данной части работы будет рассмотрена система оптического контроля [50-57], располагающаяся после печи оплавления. Выбранное размещение АОИ самое распространенное, так как на выходе продукции необходимо отсеять забракованные изделия.

После оплавления печатная плата по конвейеру перемещается в установку АОИ. Внутри установки печатную плату подсвечивают в зависимости от конфигурации АОИ разными цветами для увеличения количества определяемых дефектов. Обнаружение дефектов производится камерой находящейся сверху печатной платы.

На рисунке 27 показано расположение камеры в установке двухмерной оптической инспекции. В конфигурации данной установки предусмотрено использование четырех цветов подсветки печатной платы: основного белого, направленного перпендикулярно плате, а также синего, зеленого и красного, направленных под углом.

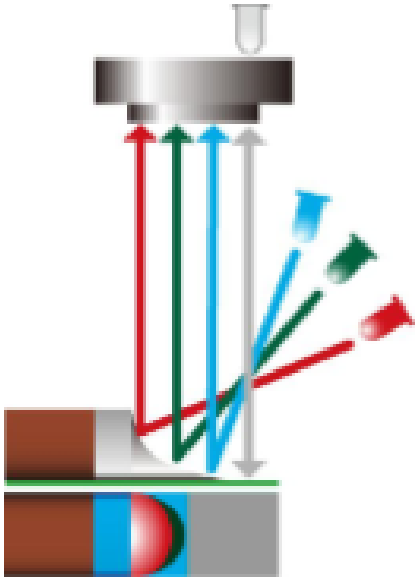

Рисунок 27 – Схема расположения камеры в 2D АОИ

В зависимости от исполнения установок инспекция может производиться двумя способами:

1) при неподвижной печатной плате и перемещающейся камере;

2) при неподвижной камере и перемещающейся равномерно по конвейеру плате. Стоит отметить, что данный метод занимает меньше времени.

Этап контроля качества сборки посредством использования АОИ автоматизирован, однако при появлении дефектов информация о проблемной области отправляется на монитор ремонтной станции. Оператор, полагаясь на свой опыт, принимает решение о том, что это: допустимая вариация, ложное срабатывание или же это реальный дефект.

1.5. Анализ жизненного цикла радиоэлектронной продукции

На рисунке 28 представлен жизненный цикл РЭП, в рамках данной работы рассматриваются операции предпроизводственного этапа для контрактного производства электроники. Согласно описанной ранее схеме кооперации предприятий при производстве РЭП все этапы диверсифицированы, таким образом процесс производства печатных плат [58-66] в схеме отнесен к предпроизводственному этапу, поскольку платы для монтажа изготавливаются у стороннего предприятия.

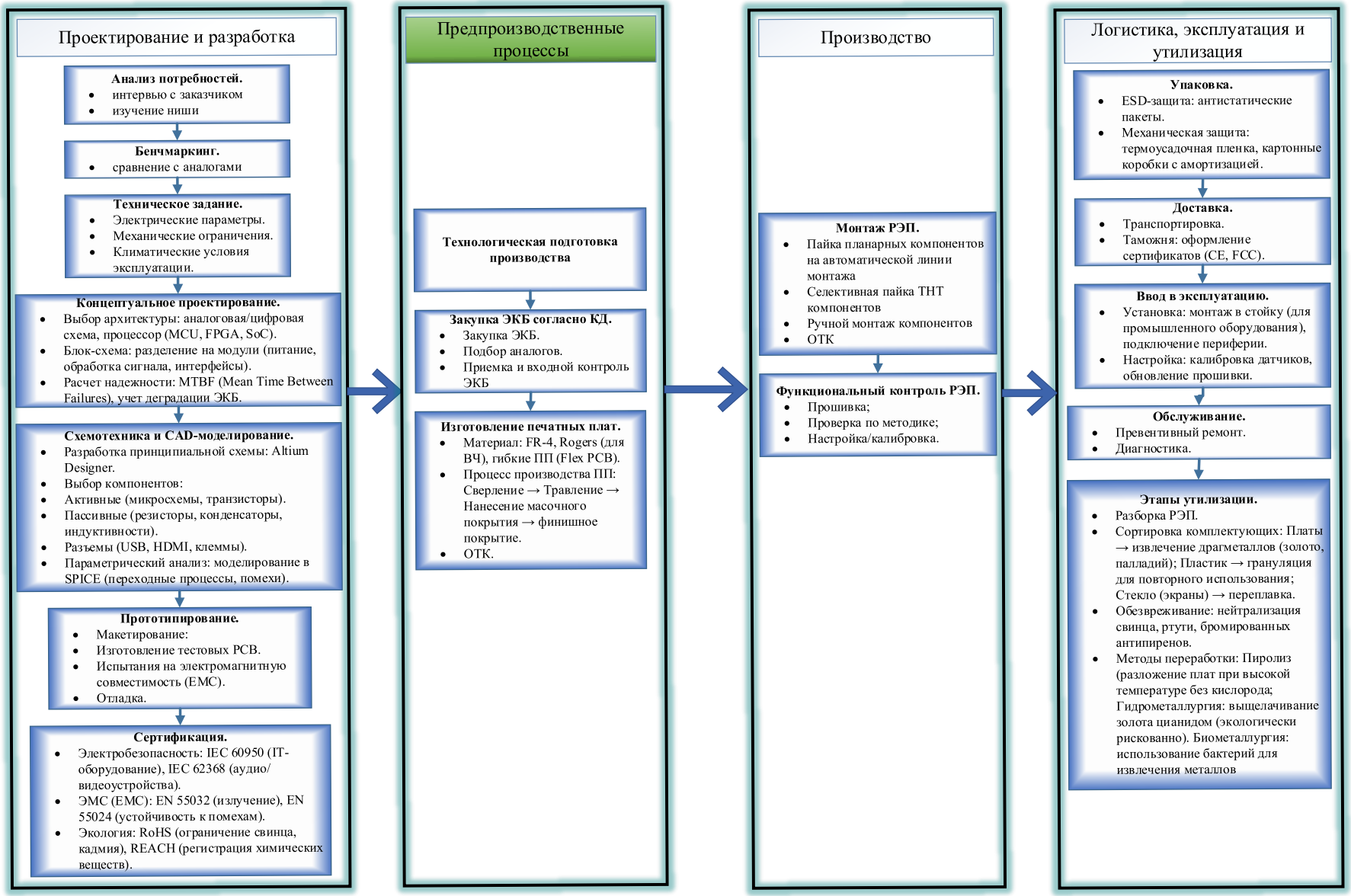

Рисунок 28 – Жизненный цикл РЭП

Значительный вклад в повышение качества производства электронной продукции внесла концепция «Индустрия 4.0» [67-72], благодаря внедрению принципов 4-й промышленной революции, таких как IoT, M2M и т.д., процент продукции, несоответствующей стандарту IPC-A-610E, снизился. Количество изделий, отбракованных в результате прохождения линии автоматического монтажа, сокращается. Результат достигается за счет снижения влияния действий оператора линии на технологический процесс в режиме реального времени.

Для целей данной работы жизненный цикл производства электронной продукции можно обобщенно рассматривать в виде следующих этапов:

1. Схемотехнические и конструкторские работы;
2. Предпроизводственные процессы;
3. Производство.

Этапы схемотехнических и конструкторских работ непрерывно модернизируются разработчиками CAD-систем. Данные этапы выведены на достаточный уровень автоматизации, чтобы направлять основную деятельность сотрудников не на рутинный подсчет определенных параметров, а на «творческую» деятельность, которую в настоящий момент ЭВМ выполнять не может.

Этап производства более подробно был описан в разделе 1.4 и с учетом соблюдения правил проектирования является автоматическим, т.е. с минимальным вмешательством кадрового ресурса во время производства.

Схема жизненного цикла производства РЭП представлена на рисунке 29. Ввиду того, что упомянутые ранее этапы не рассматриваются в данной работе, декомпозиция для них на рисунке отсутствует.

Технологическая подготовка производства имеет большое количество трудноформализуемых процессов, которые не представляется возможным привести к определенному алгоритму для ЭВМ и часто требует специфических знаний при принятии решений.

Требуемые знания включают как опыт производства определенных типов электронной продукции, так и имеющееся в наличии оборудование. В текущий

момент в мире существуют организации, создающие базы знаний, к которым могут обращаться программы и кадровые ресурсы предприятий-производителей, однако ввиду большого объема информации данные ресурсы не могут полностью исключить «творческую» составляющую из описанных процессов.

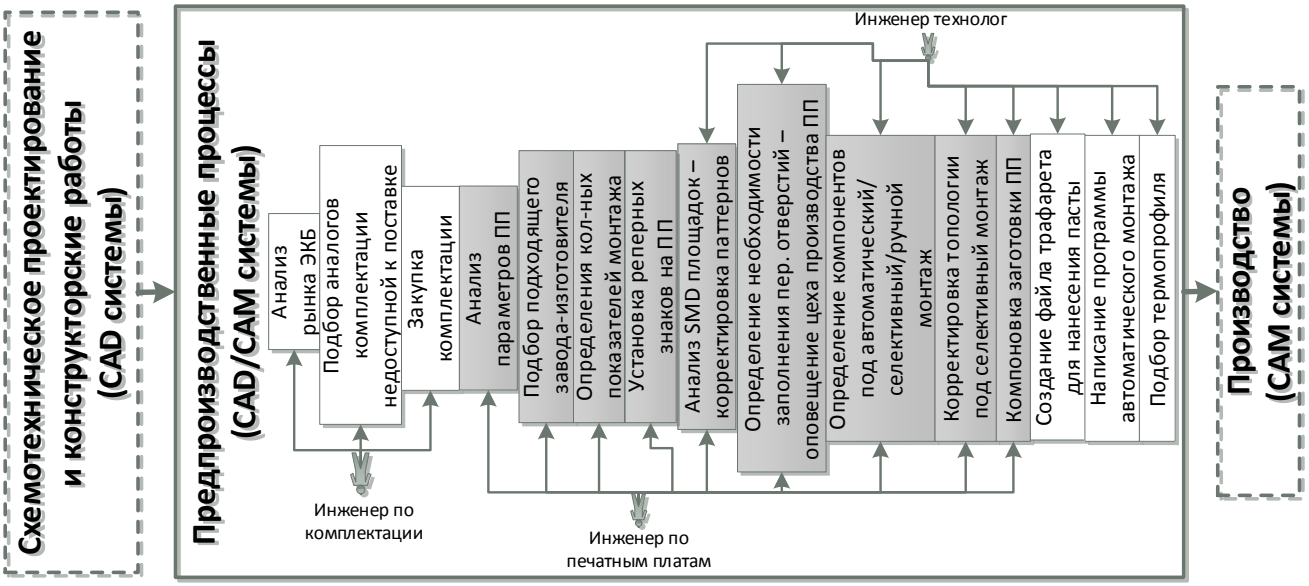

Рисунок 29 – жизненный цикл производства РЭП

В ходе анализа по декомпозиции, представленной на рисунке 29, были выявлены процессы, которые возможно улучшить при помощи доступных технологий:

1. Анализ параметров ПП;
2. Подбор подходящего завода-изготовителя;
3. Определения количественных показателей монтажа;
4. Установка реперных знаков на ПП;
5. Анализ SMD площадок – корректировка паттернов;
6. Определение необходимости заполнения переходных отверстий по IV типу [73] – оповещение цеха производства ПП;
7. Определение компонентов под автоматический/селективный/ручной монтаж;
8. Корректировка топологии под селективный монтаж;

9. Компоновка заготовки ПП.

Вышеуказанные этапы на сегодняшний день выполняются вручную, что приводит к высокой загрузке кадрового состава и наличию большого количества ошибок, характеризующихся «человеческим фактором». Ниже представлена таблица на основе экспертных оценок и статистической базы о времени и проценте ошибок при проведении рассматриваемых операций (таблица 14)

Таблица №14 – анализ рутинных операций при технологической подготовке проекта

Наименование операции	**Время выполнения, мин.**	**Процент несоответствий, %**
Анализ параметров ПП	10-20	3
Подбор подходящего завода-изготовителя	5	2
Определения количественных показателей монтажа	180	21
Определение сложности монтажа	10	6
Определение необходимости заполнения пер. отверстий – оповещение цеха производства ПП	15	3
Компоновка заготовки ПП	15	1
Разметка линий скрайбирования	10	0,1
Корректировка посадочных мест (одного посадочного места)	7	3,5
Определение топологии вблизи не металлизированных краев ПП	8	3
Определение компонентов под селективную пайку	10	3
Размещение реперных знаков на ПП (в случае наличия технологических полей)	5	2

В результате проведенного анализа установлено, что указанные операции необходимо автоматизировать для повышения качества технологического процесса и сокращения времени проведения технологической подготовки производства.

Одновременно, при анализе операций ЖЦ изделия были выявлены следующие проблемы:

1. Большое количество операций, имеющих значительные затраты временного ресурса, при технологической подготовке изделия к монтажу;
2. Большая длительность определения количественных показателей монтажа РЭП;
3. Классификация сложности монтажа имеет субъективный характер и подвержена влиянию «человеческого фактора»;
4. Длительный поиск информации в сети Интернет, либо в конструкторской документации изделия;
5. Отсутствие сквозной модели управления ЖЦ изделия, ввиду участия нескольких контрагентов в создании РЭП.

На сегодняшний день некоторые из представленных этапов в той или иной мере автоматизированы в CAD/CAM-системах в виде функции Design Rule Checking (DRC) и программном обеспечении DFM-Expert [74]. Несмотря на то, что данное ПО значительно упрощает работу кадрового состава и сокращает время технологического анализа, имеющийся функционал не покрывает все потребности, возникающие при технологической подготовке производства (ТПП), как представлено в таблице 15.

Таблица 15 – Сравнение, имеющихся ПО для ТПП

Существующие инструменты ТПП	**Недостатки**	**Достоинства**
Design Rule Checking (входит в состав CAM/CAD-систем)	Отсутствие возможности контролировать корректность топологии при работе в CAM	При правильной настройке позволяет на этапе проектирования обнаружить несоответствия в случае с CAD-системами
	Задаются на этапе конструирования и не учитывают производственные требования.	

Продолжение таблицы 15

Существующие инструменты ТПП	**Недостатки**	**Достоинства**
Design Rule Checking (входит в состав CAM/CAD-систем)	Отсутствие возможности контролировать корректность топологии при работе в CAM	При правильной настройке позволяет на этапе проектирования обнаружить несоответствия в случае с CAD-системами
	Задаются на этапе конструирования и не учитывают производственные требования.	
DFM-Expert (стороннее ПО для DFM-анализа)	Высокая стоимость ПО	Позволяет определить конструкторские несоответствия до запуска производства, а также оценить возможность сборки согласно стандартам IPC
	Отсутствие требуемых инструментов корректировки топологии	
Методики корректировок ПП (разработанные предприятиями РИ)	Выполняются инженерами без сопровождения автоматизированных систем, что приводит к большим временным затратам и возникновению ошибок	Отсутствуют

Причиной несовершенств имеющегося на текущий момент времени ПО является то, что рассматриваемые в данном разделе этапы являются трудноформализуемыми – приведение данных процессов к конкретному алгоритму для ЭВМ с имеющимися на сегодняшний день технологиями, базами данных и знаний, не представляется возможным.

1.6 Результаты и выводы по разделу 1

В первом разделе проанализировано текущее состояние и перспективы развития предпроизводственного этапа РЭП в области контрактного производства электроники, а также причины, приводящие к необходимости модернизации процессов. Определены перспективы развития указанных областей.

В данный момент времени мировой вектор развития производственных процессов направлен на автоматизацию и цифровизацию всех этапов подготовки к запуску монтажа и производства изделий. Однако, сохраняется важная проблема, связанная с трудноформализуемыми этапами, на которых исключить рутинное выполнение действий не представляется возможным. Ввиду этого разработки в области программного обеспечения направлены на снижение влияния «человеческого фактора» посредством создания сегментированных и диалоговых технологий внесения изменений в КД РЭП.

Значительный вклад в повышение качества производства электронной продукции 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. Это достигается снижением 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, кадровый состав и т.д. Исходя из данной тенденции возникает важная проблема: существующие технологии сквозного проектирования и производства не действуют, ввиду участия большого количества компаний в ЖЦ производства изделия. Каждый контрагент выполняет возложенную на него задачу, например, разработка, монтаж, закупка комплектации, изготовление печатных плат.

Мировая практика в области контрактного производства показывает, что участие разных контрагентов возможно не только на разных этапах, но и в рамках

одного этапа. Например, предприятие разработало изделие, однако, не имеет кадрового ресурса способного оперативно провести конструкторские работы с учетом требований производств.

При анализе операций ЖЦ изделия были выявлены следующие проблемы:

1. Большое количество операций, имеющих значительные затраты временного ресурса, при технологической подготовке изделий к монтажу;
2. Большая длительность определения количественных показателей монтажа РЭП;
3. Классификация сложности монтажа имеет субъективный характер и подвержена влиянию «человеческого фактора»;
4. Длительный поиск информации в сети Интернет, либо в КД изделия;
5. Отсутствие сквозной модели управления ЖЦ изделия, ввиду участия нескольких контрагентов в создании РЭП.

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

2. Разработка моделей повышения качества производства радиоэлектронной продукции в условиях цифровизации производства

2.1. Обобщенная математическая модель процессов на основе поэтапной оценки вероятностных характеристик несоответствий

Согласно модели, описанной в [75-80], при помощи математического аппарата, представленного в [81-84], состояние процесса в наиболее полном виде характеризуется выходными переменными Y, начальными условиями Y_0 и параметрами Λ с плотностями n-мерного и m-мерного распределений вероятностей $P_y(y_1,\dots y_n,\ t)$, $P_\lambda(\lambda_1,\dots\ \lambda_m,\ t)$. При этом переменные Y являются случайными функциями, а начальные условия и параметры обычно представляются случайными величинами. Поэтому построение дифференциальных уравнений для определения плотностей вероятности распределений выходных переменных позволяет в дополнение к существующим средствам информационных технологий создать «сквозной» инструментарий на основе «цифрового двойника» как для проектных, так и для производственных этапов. В этом случае уже во время схемотехнического проектирования становится возможным учет технологических требований при подготовке производства изделий, которые заданы в ТЗ. Движение «цифрового двойника» в процессе проектирования и подготовки производства в общем виде представлено на рисунке 30.

На рисунке 30 обозначены следующие переменные:

1. Начальные плотности вероятности распределения случайных функций (ПВРСФ) $P_0(Y_0,\ \Lambda_0,\ t_0)$ и случайных величин (ПВРСВ), которые задаются по априорным данным (ТЗ и «пересчетам» ПВРСВ: υ в Λ_0 по результатам конструкторских расчетов; υ, как функции ПВРСВ; ξ, полученных по результатам испытаний; ξ, как функции μ, полученные по техническим характеристикам комплектующих);

2. L_1, L_2, L_3, L_4 — математические модели операторов;

3. P_{10}, P_{20}, P_{30}, P_{40} — начальные значения соответствующих плотностей вероятностей.

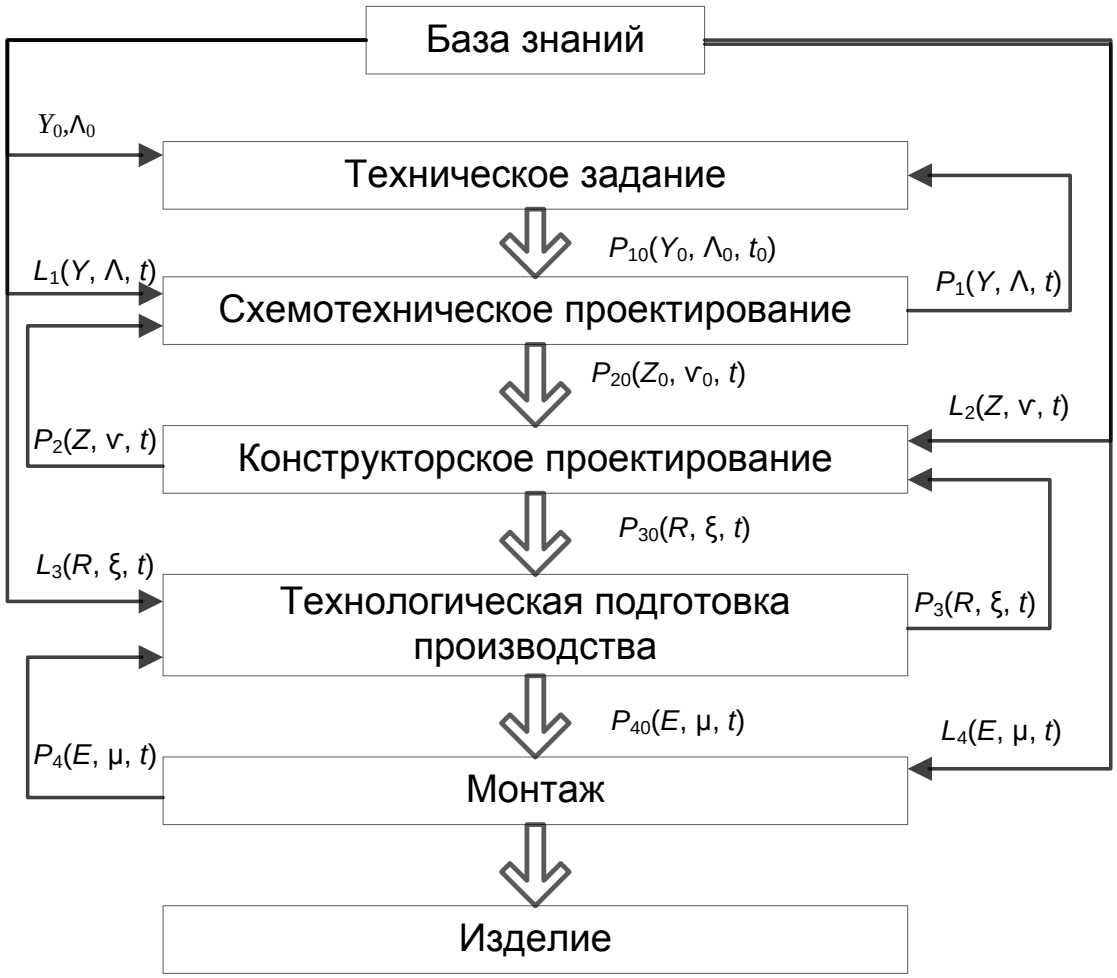

Рисунок 30 – Этапы проектирования и подготовки производства

Согласно предложенной модели на всем ЖЦ производства появляется возможность оценки вероятности перехода на следующий этап, а также вероятности возврата на предыдущий.

Для получения этих вероятностей необходимы статистические данные о значениях начальных плотностей вероятности и о математических моделях операторов. В [77-78] показано, что, согласно схеме, на рисунке 30, математические модели и соответствующие связи между этапами можно представить по отношению к плотностям вероятностей распределения выходных переменных, внутренних переменных и параметров на соответствующих этапах. На схеме также показано, что определение предыдущих плотностей вероятностей через последующие на основе известных функции связи проводятся по известным в теории вероятностей соотношениям через производные этих функций, обратные

заданным. После ряда математических преобразований [77-78] уравнение состояния системы приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений.

Построение дифференциальных уравнений для определения плотностей вероятности распределений выходных переменных (несоответствий/брака) позволяет создать «сквозной» инструментарий, который предоставляет возможность еще на этапе проектирования учесть технологические требования при подготовке производства изделий, оценить сроки и экономические показатели производства РЭП.

В соответствии с предложенной схемой происходит «движение» цифровой математической модели объекта проектирования и производства «сверху-вниз» - прямой проход, а корректировка параметров модели «снизу-вверх» - обратный проход.

Прямой проход в [77-78] представлен для всех этапов производства электроники. Однако, в рамках данного раздела внимание будет сконцентрировано на этапе конструирования и технологической подготовки.

Согласно обобщенной модели процессов жизненного цикла производства электроники на этапах конструкторского проектирования и технологической подготовки производства по выбранным критериям строятся оценки качества, которые служат для определения и контроля состояний изделия и движения его математической модели от ТЗ до опытного образца. В этом случае используются дифференциальные уравнения по отношению к плотностям вероятности, полученные по частным моделям. Так на конструкторском этапе строится ряд таких моделей, определяемых разбиением конструкции киберфизических систем на подсистемы. Посредством преобразований можно получить уравнения для плотностей распределения вероятностей на этапе конструирования в виде (7):

$$\frac{\partial P_2(z,\upsilon,t)}{\partial t} = \xi_3 * F(Z,\upsilon) + \xi_4 * P_2(Z,\upsilon,t), P_{20}(Z,\upsilon,t_0), \qquad (7)$$

где $P_2(Z, \upsilon, t)$ – плотность вероятности распределения расчетных переменных конструкции Z, υ – параметры конструкции. ξ_3, ξ_4- матрицы Якоби. $P_{20}(Z, \upsilon, t_0)$задаются через функции связи $f_2(\xi)$

Технологическая подготовка производства связана с анализом прохождения потоков конструктивных моделей через технологическую линию. В этом случае применяется представление технологического процесса в виде Марковского случайного процесса с непрерывным временем. Представляя технологический процесс размеченным графом G[P(t), B(t)], где P(t) – плотность вероятности событий, B(t) – интенсивности переходов, математическая модель технологического процесса примет вид (8):

$$\frac{\partial P_3(R, \xi, t)}{\partial t} = B * P_3(R, \xi, t), P_{30}(R, \xi, t_0) \qquad (8)$$

где: $P_3(R, \xi, t)$ – вектор плотностей вероятностей состояний изделия, B – матрица интенсивностей переходов с компонентами $B_{ij}(t)$, (i, j = 1,2,….,n).

В силу того, что значения характеристик моделируют случайную величину, представляющую собой число событий, произошедших за фиксированное время, а события происходят с некоторой фиксированной средней интенсивностью, представленной матрицей B в (11) и независимо друг от друга, применяется вероятностное распределение Пуассона дискретного типа. Соответствующие плотности распределения вероятности находят для всех характеристик качества, управляемых на каждой операции.

Обратный проход по оценке качества проиллюстрирован на примере корректировки этапов схемотехнического и конструкторского проектирования, технологической подготовки и монтажа материнских плат для серверов.

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 электронной продукции.

Модель, описанная в настоящем разделе, охватывает все этапы производства электронной продукции, а также при достаточной статистической базе и разработке подходящего ПО для анализа данной информации способна предоставить оценку вероятности появления будущих несоответствий, что непременно приведет к повышению количества выхода годных изделий и снижению времени проведения НИОКР.

Следует отметить, что для применения приведенной обобщенной модели необходимы исходные статистические данные о значениях начальных плотностей вероятности, о математических моделях операторов, видах функций связи и обратных им функциям.

Ниже приведен концептуальный перечень необходимых для подсчёта вероятности по обобщенной модели статистических данных, отсутствующих на сегодняшний день [85]:

1. Статистические данные об ошибках схемотехнического проектирования для современной элементной базы;
2. Статистические данные об ошибках конструкторского проектирования для современной элементной базы;
3. Статистические данные об ошибках конструкторского проектирования сборочных единиц;
4. Статистические данные об ошибках, возникающих на этапах технологической подготовки производства для современной элементной базы и HDI ПП;
5. Статистические данные о несоответствующих результатах монтажа на автоматических линиях, ручном монтаже и сопутствующих операциях.

Стоит отметить, что каждое производство электроники собирает собственную статистику по несоответствующим результатам производства продукции, однако, данная статистика не предоставляет необходимых данных для модели, ввиду субъективности структурирования и отсутствия разделения данной статистики применительно к каждому конкретному сборочному элементу электронного изделия.

Одновременно с вышеперечисленным в текущий момент отсутствует необходимый инструментарий для сбора данной информации ввиду того, что все применяемые в автоматических линиях монтажа [86,87] установки имеют иностранное происхождение и закрытое для пользователя программное обеспечение, что не позволяет использовать установки для выполнения иных операций помимо ранее запрограммированных. В рамках данной работы разработана программа мониторинга радиопередающих устройств по протоколу LORAWAN, а также программы контроля работы базовых станций [88-90]. Посредством разработанных программ возможно организовать систему сбора, регистрации и передачи информации с производственного отдела в соответствующие базы данный для последующего использования в расчетах обобщенной математической модели.

В связи с обозначенными выше проблемами применение обобщенной модели в полной мере не представляется возможным до глобального внедрения принципов Индустрии 4.0. Вместе с тем основные идеи, заложенные в обобщенной модели, в том числе преобразования описаний при переходе с этапа на этап и рекурсивные модели, легли в основу разработанных частных модифицированных моделей, которые необходимы для обеспечения качества конкретных процессов и производств.

2.2. Модифицированная версия обобщённой математической модели оценки качества процессов

В настоящее время перед производителями и конструкторскими бюро электронной промышленности стоит задача импортозамещения и применения доступных аналогов ЭКБ. Данный вектор развития приводит к тому, что из-за проблем поставки известных ранее электронных компонентов, у вышеуказанных участников жизненного цикла создания электроники появляется необходимость внесения изменений уже в существующую и проверенную в работе КД РЭП. В связи с этим в рамках данного раздела была разработана модель оценки вероятности возникновения несоответствий на этапах комплектования изделий.

В [77-78] ЖЦ создания электронной продукции укрупненно представлен тремя основными этапами: схемотехнические/конструкторские работы, подготовка производства и непосредственно само производство. Практически все этапы непрерывно контролируются людьми, что сказывается на повышении вероятности возникновения несоответствий ввиду человеческого фактора. Этап схемотехнических/конструкторских работ, насколько позволяет доля рутинных операций, достаточно формализован, автоматизирован средствами САПР, CAD и рассмотрен во многих работах.

В отличие от указанных этапов технологическая подготовка производства является трудноформализуемым процессом. На данном этапе требуется постоянный анализ и принятие решений, для которых существуют проблемы полной автоматизации. В известной литературе необходимые методы не представлены. В то же время полезную новизну представляет разработка инструментария в виде методов и алгоритмов на основе диалога машины и лица, принимающего решения (ЛПР). Такой подход позволяет снизить вероятность ошибки «человеческого фактора». Для оценки результативности контроля качества производства электронной продукции предложена методика поэтапной оценки вероятностей несоответствий.

Процессы этапа ТПП

Одним из первых этапов ТПП является анализ применяемой в изделии электронной компонентной базы, определение каналов ее поставки, а также определение параметров монтажа ЭКБ на печатную плату. На данном этапе проводится оценка количественных параметров монтажа, технологических характеристик, а также возможности поставки ЭРИ и рентабельность ценовой политики. При выполнении указанных действий лица, принимающие решения, работают с большим количеством информации, которое можно представить в виде множеств: применяемой ЭКБ и каталогов поставщиков комплектации. При работе с указанными множествами высока вероятность ошибки ввиду большого номенклатурного перечня, применяемого для современных изделий (например, серверные материнские платы 3000-7000 шт. компонентов).

Состав процессов ТПП и вид плотности распределения первичных несоответствий приведен в таблице 16.

Таблица 16 – Состав процессов ТПП при анализе комплектации и вид плотности распределения первичных несоответствий.

Процесс	**Вид плотности распределения**	**Обоснование**
Формирование и валидация ведомости покупных ЭК по перечню элементов	непрерывное нормальное	несоответствия (ошибки обработки перечня комплектации) определяются на большом множестве возможных событий и независимы друг от друга
Актуализация ведомости покупных ЭК по базам данных	непрерывное нормальное	несоответствия (выбор электронных компонентов) определяются на большом множестве возможных событий и независимы друг от друга
Валидация закупленных ЭК	непрерывное нормальное	несоответствия (технологические ошибки) определяются на большом множестве возможных событий и независимы друг от друга
Валидация КД и ТД печатных плат	дискретное распределение Пуассона	несоответствия (брак) происходят с некоторой фиксированной средней интенсивностью и независимы друг от друга

В рамках данной работы было рассмотрено отображение множеств [91] и появление их итераций на этапе «подбор/поставка комплектующих изделий» (рисунок 31).

Для описания этапа введем следующие множества:

1. Спецификация изделия в момент передачи КД в отдел подбора комплектации является исходным множеством S_0 $\{S_{01}, S_{02},\ldots,S_{0n}\}$, где $S_{01}, S_{02},\ldots,S_{0n}$ – наименования комплектующих изделий.

2. Последующие итерации спецификации обозначим множествами S_1, $S_2,\ldots S_n$

3. Мировая библиотека ЭКБ является множеством S_W {S_{W1}, S_{W2}, …, S_{Wn}}, где S_{W1}, S_{W2},…, S_{Wn} - наименования существующих в мире компонентов.

4. Библиотека ЭКБ, которая доступна к закупке, является множеством S_A{S_{A1}, S_{A2}, …, S_{An} }, где S_{A1}, S_{A2}, …, S_{An} – наименования компонентов доступных к закупке.

Представленные множества имеют следующие взаимосвязи:

1. $S_A \subseteq S_W$

2. $S_0 \subseteq S_{W.}$ – в случае отсутствия ошибок на стадии проектирования

3. $S_0 \subseteq S_A$ – в случае отсутствия ошибок на стадии проектирования и доступности всей заложенной в изделии ЭКБ на рынке.

Первым этапом производится проверка оформления спецификации. В процессе проверки возможно выявление дублирования номиналов на разных позициях, указание несуществующих наименований, опечаток и т.д. 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 спецификация элементов, по которой в основном проводится закупка и производство изделий ввиду ее удобства и компактности. Таким образом, основной целью данного этапа является приведение полученного множества S_0 к множеству S_{0n}, так, чтобы в конечном итоге отображение множества применяемой ЭКБ и мировой библиотеки имело вид инъекции: f:$S_{0n} \rightarrow S_W$ [91].

После приведения множества S_0 к множеству S_{0n} производится анализ каналов поставки. На данном этапе выявляются компоненты, которые недоступны 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. Стоит отметить, что в процессе монтажа есть вероятность выявления допущенных на ранних этапах ошибок, связанных с комплектацией, таким образом во время их устранения возможно возникновение новой итерации множества ЭКБ. После проведения всех необходимых действий отображение множества применяемой ЭКБ и библиотеки ЭКБ, доступной к закупке, имеет вид инъекции: f:$S_k \rightarrow S_A$.

На рисунке 31 представлена упрощенная модель обработки комплектующих изделий при производстве электроники. Для оценки вероятности возникновения несоответствия на каждом этапе в данной работе используется определение вероятностных характеристик дискретной случайной величины через δ-функцию. Это позволяет аналогично с предложенной в [77-78] схемой прослеживать «движение» цифровой математической модели объекта, проектирования и производства «сверху-вниз» при прямом проходе, а также с помощью обратных функций проводить корректировку параметров модели «снизу-вверх» при обратном проходе.

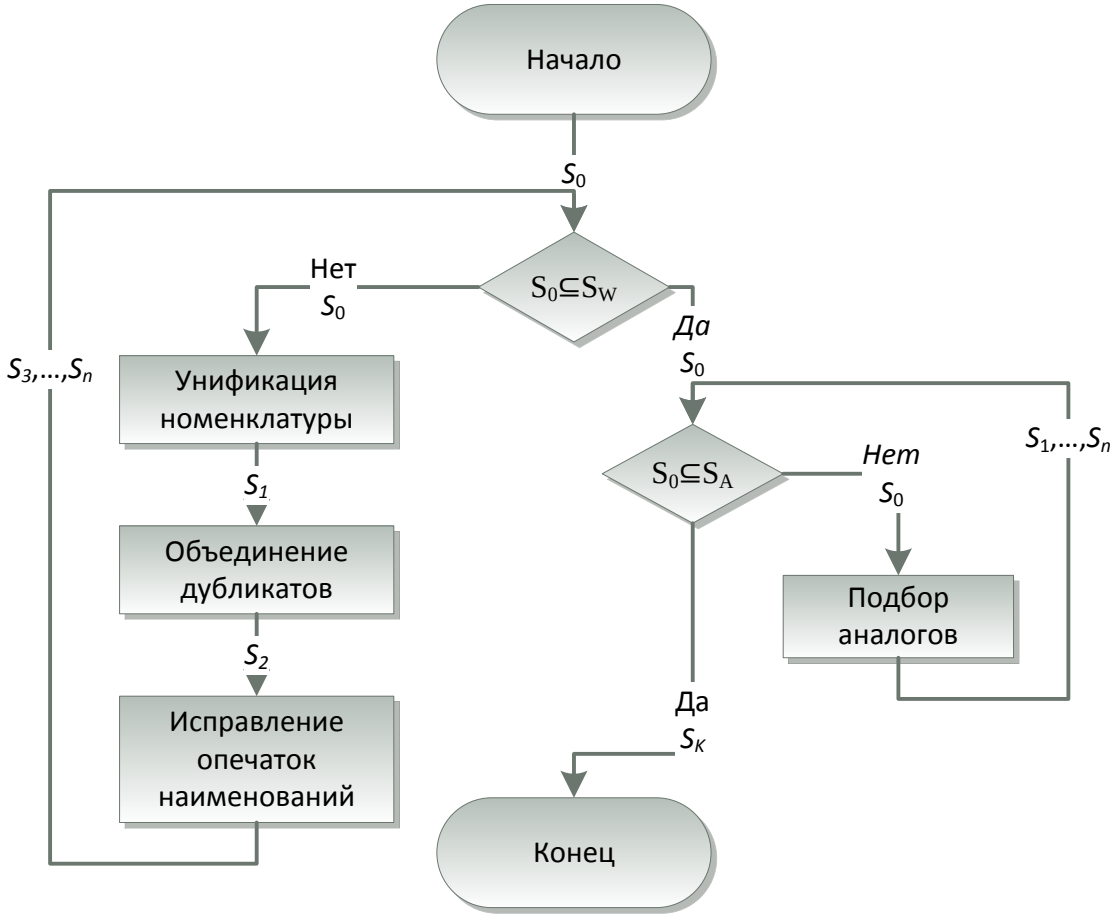

Рисунок 31 – Упрощенный алгоритм приведения отображения множеств $f:S_k \rightarrow S_A$ к инъекции

В таблице №17 приведен пример анализа для компонента STM32F103C8T6. Как видно, компонент находится в исходной спецификации заказчика (S_0) и в составе мировой библиотеки ЭКБ (S_W), однако, он не

принадлежит множеству доступной к закупке ЭКБ (S_A), в связи с этим в конечное множество к закупке (S_K) попадает его прямая замена CH32F103C8T6

Таблица №17 – Анализ компонента STM32F103C8T6

Наименование ЭКБ в множестве S0	S_0	S_W	S_A	S_K	Наименование ЭКБ в множестве S_K
STM32F103C8T6	✓	✓	✗	✗	CH32F103C8T6

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 ЭКБ изделия и может принимать n различных значений среди множеств S_W. Соответствующая функция вероятностной характеристики имеет вид (9):

$$f(x) = \sum_{k=1}^{N} p_k \delta(x - x_k) \quad (9)$$

δ-функция [92] 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 компонента и рассчитываются в индивидуальном порядке по известным в теории вероятностей формулам, учитывающим: похожие наименования и ближайшие номиналы, которые отличаются от исходных, но 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 $[a, b]$.

На рисунке 32 обозначены этапы, на которых возможно появление несоответствий ввиду манипуляций с элементной базой.

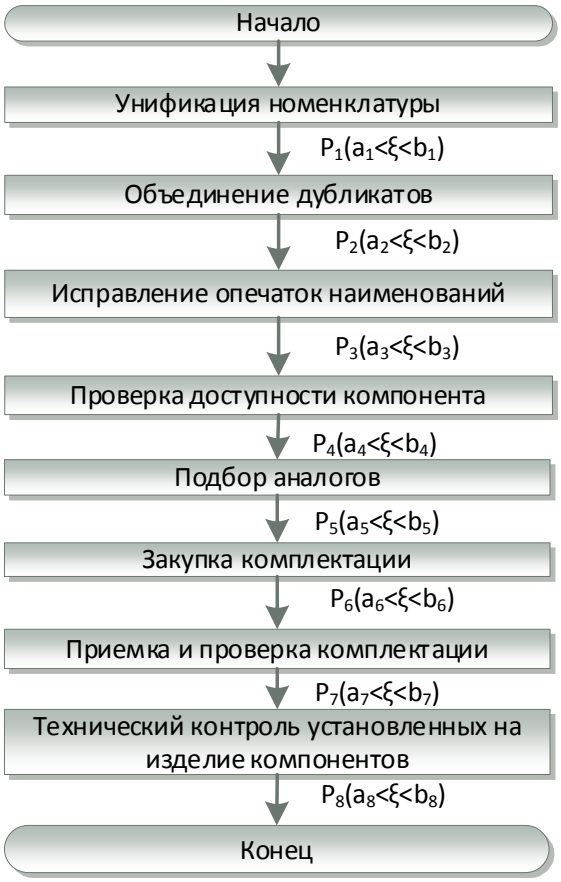

Рисунок 32 – Упрощенная модель ТПП в части обеспечения изделия необходимой комплектацией

Таким образом, вероятность может быть вычислена, исходя из общих свойств плотности по формуле [93-94] (10):

$$P(a \le \xi \le b) = \int_a^b f(x)dx = \int_a^b \sum_{k=1}^{N} p_k \delta(x - x_k)dx = \sum_{k=1}^{N} p_k \int_a^b \delta(x - x_k)dx \quad (10)$$

Где (11),

$$\int_a^b \delta(x - x_k)dx = \begin{cases} 1, k = x_a \\ 0, k = x_D \end{cases} \quad (11)$$

x_a – компоненты, входящие в интервал [a, b]

x_D – компоненты, не попадающие в интервал [a, b]

Вероятность возникновения несоответствия на каждом этапе рассчитывается по формуле [90-91] (12):

$$P_k(a \leq \xi \leq b) = 1 - \sum_{k}^{N} p_k \quad (12)$$

При этом важно учитывать условие нормирования по каждому компоненту (13).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = \sum_{1}^{N} p_k = 1 \quad (13)$$

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.

В отличие от обобщенной модели контроля качества процессов ЖЦ РЭП, предложенная модель оценки несоответствий на этапе комплектования требует меньшего объема данных, уже доступных для структурированного применения на основе статистики, полученной при верификации закупленной ЭКБ.

Применение модифицированной математической модели процессов

Применение предложенной модели представлено на рисунке 33. Модель имеет следующие составляющие:

1. Лицо принимающее решение
2. База данных о компонентах (состав представлен на рисунке 33)
3. Спецификации РЭП (множество S_0)
4. ЭВМ для организации работы с БД.

ЛПР анализирует каждый номинал из спецификации путем поиска информации о нем в БД, в которой хранится вся необходимая статистика и возможные аналоги. Данные по компоненту преобразовываются в вероятностное значение возникновения несоответствия. При помощи описанной δ-функции оператор рассчитывает итоговое значение возможности появления несоответствия для конкретного типа РЭП.

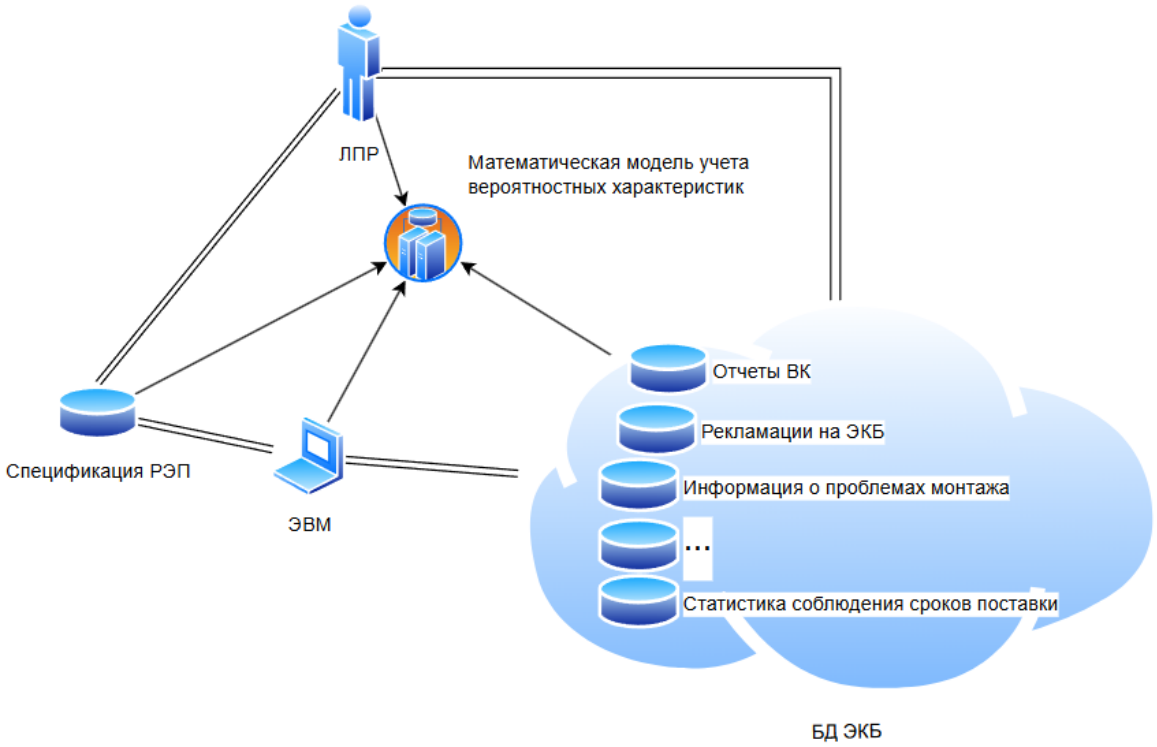

Рисунок 33 – Применение рекурсивной математической модели.

В рамках предложенной модели у производителей электроники появляется возможность на этапе анализа ЭКБ оценить вероятность появления несоответствий, которые могут привести к увеличению сроков производства и дополнительным затратам, и принять превентивные меры для их устранения. Дальнейшим вектором развития данной модели является определение обратных функций, позволяющих корректировать предложенную математическую модель с учетом произошедших событий появления несоответствий.

2.3. Рекурсивная математическая модель оценки качества процессов производства РЭП

Современное оборудование [95], применяемое контрактными производителями при комплектовании и монтаже изделий, позволяет собирать, структурировать и анализировать информацию на разных этапах создания электронной продукции. В рамках данного исследования с целью повышения достоверности контроля качества процессов и повышения выхода годных изделий была выведена рекуррентная формула [96-97] оценки вероятности возникновения несоответствий на четырех контрольных точках:

1. Верификация компонентной базы
2. SPI
3. АОИ после установщика компонентов
4. АОИ после печи оплавления

Для модели введены следующие переменные:

S_0 – количество образцов в серии (для малосерийного производства 100…300);

$p_1 \ldots p_4$ – 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, производится по следующим формулам (14-17):

$$M[N_1] = S_0 p_1 \tag{14}$$

$$M[N_2] = (S_0 - S_0 p_1) p_2 = S_0 p_2 (1 - p_1) \tag{15}$$

$$M[N_3] = [S_0 - S_0 p_2(1- p_1)] p_3 = S_0 p_3[1 - p_2 (1 - p_1)] = \tag{16}$$

$$S_0 [p_3 - p_2 p_3 (1 - p_1)] = S_0 p_3 (1- p_2 + p_1 p_2)$$

$$M[N_4] = [S_0 - S_0 p_3[1 - p_2 (1- p_1)] p_4 = S_0 p_4[1 - p_3 + p_2 p_3 (1 - p_1)] = S_0 p_4 (1- \quad (17)$$
$$p_3 + p_2 p_3 - p_1 p_2 p_3)$$

Оценка вероятности P_n несоответствий на n-ом этапе с учетом предыстории появления несоответствий на предыдущих n-1 этапах представлена знакопеременным рядом (18):

$$P_n = p_n (1- p_{n-1} + p_{n-2} p_{n-1} - p_{n-3} p_{n-2} p_{n-1} + p_{n-4} p_{n-3} p_{n-2} p_{n-1} - p_{n-5} p_{n-4} p_{n-3} p_{n-2} p_{n-1} + \quad (18)$$
$$+p_{n-6} p_{n-5} p_{n-4} p_{n-3} p_{n-2} p_{n-1} - \dots + p_{n-(n-1)} \dots p_{n-1}), n=2k+1$$

Для общего случая, описанного в разделе 2.1., в математической модели используется плотность распределения вероятности непрерывных случайных величин, определяемых для конкретных проблемных областей. Рассматриваемому наукоемкому малосерийному производству соответствует вероятностное распределение Пуассона дискретного типа [98]. В модели могут использоваться доступные вероятностные характеристики несоответствий: частость, вероятность, плотность вероятности.

Применение рекурсивной математической модели.

При подготовке производства для каждого электронного изделия проводится DFM-анализ. На данном этапе корректируется топология печатной платы, формируется технологический процесс. В таблице 18 приведены статистические данные для стандартного технологического процесса автоматического монтажа, в котором учтена большая часть рекомендаций производства.

Таблица 18 – Статистические данные стандартного технологического процесса

Наименование этапа	**Вероятность возникновения несоответствия**
Верификация компонентной базы	0,01
SPI	0,01
АОИ после установщика компонентов	0,001
АОИ после печи оплавления	0,001

Так, при значениях p_1=0.01 (1%), p_2=0.01 (1%), p_3=0.001 (0.1%), p_4=0.001 (0.1%) для потока S_0=20 000шт. паяных соединений получены следующие оценки количества несоответствий и соответствующих вероятностей на этапах:

Этап 1:

Среднее количество несоответствий (19):

$$N_1=p_1 \cdot S0=0.01 \cdot 20000=200\text{шт.} \quad (19)$$

Осталось соединений после этапа 1 (20, 21):

$$S_0-N_1=20\,000-200=19\,800\text{шт.} \quad (20)$$

$$P_1=p_1=0.01(1\%) \quad (21)$$

Этап 2:

Среднее количество несоответствий (22):

$$N_2=p_2 \cdot (S_0-N_1)=0.01 \cdot 19\,800=198\text{шт.} \quad (22)$$

Осталось соединений после этапа 2 (23, 24):

$$19\,800-198=19\,602\text{шт.} \quad (23)$$

$$P_2=0.01 \cdot (1-0.01)=0.01 \cdot 0.99=0.0099(0.99\%). \quad (24)$$

Этап 3:

Среднее количество несоответствий (25):

$$N_3=p_3 \cdot (S_0-N_1-N_2)=0.001 \cdot 19\,602 \approx 19.6\text{шт.(округляем до 20шт.)} \quad (25)$$

Осталось соединений после этапа 3 (26,27):

$$19\,602-20=19\,582\text{шт.} \quad (26)$$

$$P_3=0.001 \cdot (1-0.01)+0.01 \cdot 0.01=0.001 \cdot 0.99+0.0001=0.00099+0.0001= \quad (27)$$
$$=0.00109(0.109\%)$$

Этап 4:

Среднее количество несоответствий (28):

$$N_4=p_4 \cdot (S_0-N_1-N_2-N_3)=0.001 \cdot 19\,582 \approx 19.6\text{шт.(округляем до 20шт.)} \quad (28)$$

Осталось соединений после этапа 4 (29, 30):

$$19\,582-20=19\,562\text{шт.} \quad (29)$$

$$P4=0.000999-0.00001+0.0000001 \approx 0.000989(0.0989\%) \quad (30)$$

Итоговые результаты:

Итоговое среднее количество несоответствий (31):

$$N_{общ}=N_1+N_2+N_3+N_4=200+198+20+20=438шт. \quad (31)$$

Доля среднего количества несоответствий от общего объема (32):

$$438/20\,000\cdot100\%=2.19\%. \quad (32)$$

Значения N_i позволяют на этапе расчета вероятностей возникновения несоответствий оценить количество несоответствующих изделий или паяных соединений после прохождения линии автоматического монтажа. При стандартном ТП из 20 000шт. паяных соединений 438шт. требуют ручной доработки – данное значение является математическим ожидаем и показывает приблизительное значение несоответствующих паяных соединений. Данное значение может быть обусловлено, например, качеством исполнения ПП и трафарета или «человеческим фактором».

Вероятности P_i позволяют ввести значения, при которых требуется корректировка КД и не рекомендуется старт монтажных работ.

Таким образом в случае, если рассчитанные согласно данной модели вероятности возникновения несоответствий выше определенных в данном разделе показателей, КД РЭП требует доработки.

На рисунке 34 видно, что контрольными точками, на которых проявляется наибольшее количество несоответствий: верификация ЭКБ и проверка на SPI. Типовые дефекты трафаретной печати представлены в [99].

Ведущие предприятия электронной промышленности выделяют большие ресурсы на повышение уровня входного контроля: его оснащенности и достоверности. Так в [100] представлена методика обеспечения качества входного контроля ЭКБ с применением нейронной сети. В основном отклонения выявляемые на этапе верификации ЭКБ не влияют на конечную работоспособность изделий, а приводят к трудностям автоматического монтажа. Принимая во внимание данный факт, а также сжатые сроки от поставки комплектующих до старта монтажа, в данной работе сделан вывод о необходимости корректировки предпроизводственных этапов с целью повышения технологического уровня изделий.

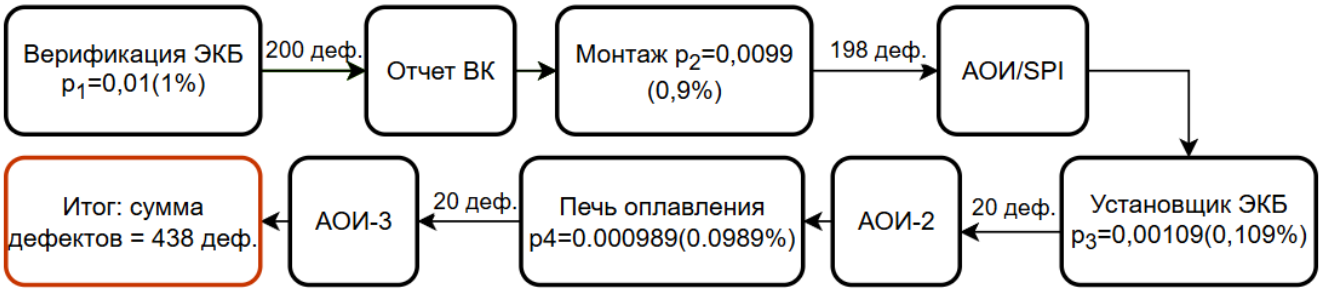

Рисунок 34 – Результат расчетов вероятностей при стандартном технологическом процессе

Второй причиной, по которой выбран этап технологической подготовки вместо входного контроля, является то, что в момент поступления на склад всех необходимых для производства комплектующих зачастую не остается времени на поставку ЭКБ без выявленных дефектов (рисунок 35).

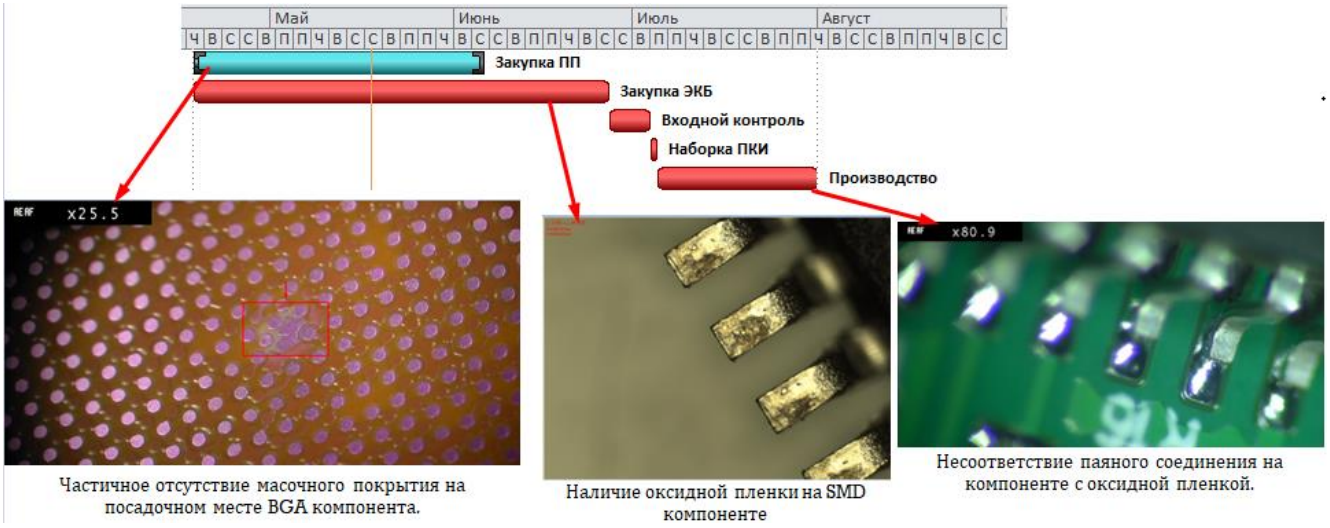

Рисунок 35 – Критический путь стандартного проекта.

Для примера на рисунке 35 представлены возможные дефекты комплектующих изделий и монтажа РЭП. При наличии окисленных выводов ЭРИ в процессе монтажа не будет образовываться галтель, соответствующая стандарту IPC-610, и изделия после завершения работы линии автоматического монтажа будут отправлены на доработку.

2.4. Результаты и выводы по разделу 2

В разделе 2 представлены модели повышения качества электронной продукции на основе оценки вероятностей возникновения несоответствий на отдельных этапах жизненного цикла создания электронной продукции.

В разделе 2.1 рассмотрена обобщенная модель процессов на основе поэтапной оценки вероятностных характеристик несоответствий. Данная модель позволяет на ранних этапах оценить готовность КД РЭП к производству, определить риски [101, 102] и выбрать технологическое оборудование. Обобщенная модель является сквозным инструментарием, охватывающим все этапы производства изделий электронной промышленности. Однако, в рамках рассматриваемого контрактного производства электроники и отсутствия необходимых средств сбора и анализа данных, ее применение в полной мере не представляется возможным до глобального внедрения принципов «Индустрии 4.0».

В разделе 2.2 обобщенная модель модифицирована в части оценки вероятности появления несоответствий на этапах комплектования изделий. Модифицированная версия обобщённой математической модели оценки качества процессов снижает вероятность появления несоответствий на этапе комплектования изделия на 3-7%. Результат достигается за счет:

1. Повышения достоверности контроля качества на всех этапах жизненного цикла еще на этапе проектирования изделия. Повышение достоверности обосновывается тем, что при оценке состояний системы помимо фактически установленных параметров используется информация из базы знаний по каждому элементу изделия;

2. Наличия возможности:

— Определения экономических и временных показателей выполнения проекта;

— По определенным вероятностям определять этапы с наибольшей вероятностью отказа и принять корректирующие меры для обеспечения качества изделий;

— Выбора технологии, обеспечивающей наименьшую вероятность появления несоответствий;

3. Повышения точности прогнозирования сроков запуска серийного производства нового изделия;

4. Повышения качества конечного изделия за счет снижения возможных несоответствий в процессе производства изделий.

В разделе 2.3 предложена рекурсивная математическая модель поэтапной оценки качества производства электронных изделий. Данная модель позволяет оценить готовность КД РЭП к производству и повышает достоверность контроля качества монтажа и комплектования РЭП. Предложенная модель может быть масштабирована на полный цикл производства изделий при наличии на производстве необходимых средств контроля. По разработанной модели:

1. Рассчитаны допустимые значения вероятностей несоответствий на четырех контрольных точках;

2. Рассчитано допустимое количество несоответствующих стандарту IPC-610 паяных соединений.

3. Принято решение о необходимости улучшения технологической подготовки производства для снижения количества несоответствий на этапе монтажа РЭП.

Расчеты произведены согласно имеющимся статистическим данным производства для стандартного технологического процесса. В случае, если при анализе КД РЭП значения вероятностей появления несоответствий превышают допустимые, должно быть принято решение о корректировке КД РЭП и технологического процесса.

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

1. Повышения достоверности контроля качества на контролируемых этапах жизненного цикла изделия. Повышение достоверности основано на

использовании автоматизированных средств контроля – автоматических оптических инспекциях;

2. Повышения точности прогнозирования сроков запуска серийного производства нового изделия;

3. Повышения качества конечного изделия за счет снижения возможных несоответствий в процессе производства изделий.

Таким образом, в рамках данной работы сформированы следующие научные положения, выносимые на защиту:

1. Модифицированная версия обобщённой математической модели оценки качества процессов, адаптированная для этапа комплектования ЭКБ, 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. 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. Методики автоматизации операций технологической подготовки раиоэлектроники

3.1. Методика автоматизации процессов предпроизводственной подготовки радиоэлектронной продукции

Так как в настоящее время мировая ситуация на рынках ЭКБ вынуждает разработчиков и производителей электронной продукции непрерывно проводить анализ наиболее выгодных предложений, а существующие методики не предоставляют достаточного инструментария для этого, стоит важная научно-техническая задача создания перспективных разработок, позволяющих разгрузить кадровые ресурсы.

В ходе анализа технологической подготовки производства были выделены операции, занимающие наибольшее количество времени. Данные операции представлены на рисунке 29. Обозначенные процессы являются трудноформализуемыми, поскольку полностью исключить ЛПР из них не представляется возможным по причине того, что исключено создание универсальных правил, которым может следовать ЭВМ.

В данном разделе разработаны методики автоматизации операций [94,103], которые позволяют сократить время корректировки печатных плат и снизить влияние «человеческого фактора», а также освободить кадровый ресурс для выполнения других задач.

Одним из первых этапов DFM-анализа при технологической подготовке производства является оценка расстояния топологии от не металлизированных отверстий. Российские заводы-изготовители печатных плат устанавливают допуск на расстояние топологии от места механической обработки равное 0.25 мм. Несоблюдение требуемого расстояния приводит к невозможности изготовления ПП. В работе представлена методика определения данного параметра (рисунок 36). На текущий момент указанная операция производится в ручном режиме, что приводит к увеличению времени анализа печатной платы.

На рисунке 36 представлены входы и выходы процесса автоматического определения расстояния от не металлизированных отверстий и краев печатных

плат. На вход алгоритма поступают графические файлы (например, в формате «.GTL», «.GBL», выведенные из Altium) и координаты отверстий (например, в формате «.TXT»), при помощи которых программа определяет необходимые элементы и может провести измерение. Для определения расстояния ориентирами принимаются все элементы проводящих слоев и контур платы из механического слоя. Сравнение производится при помощи «композитного» метода, имеющегося в CAM-системах. После создания композита получившиеся слои сравниваются с исходными слоями, за счет чего производится «подсвечивание» интересующих областей.

Рисунок 36 – Алгоритм автоматизации проверки отступов от не металлизированных отверстий

На рисунке 37 представлено расстояние между не металлизированным отверстием и огибающим полигоном, удовлетворяющее требованиям заводов-изготовителей

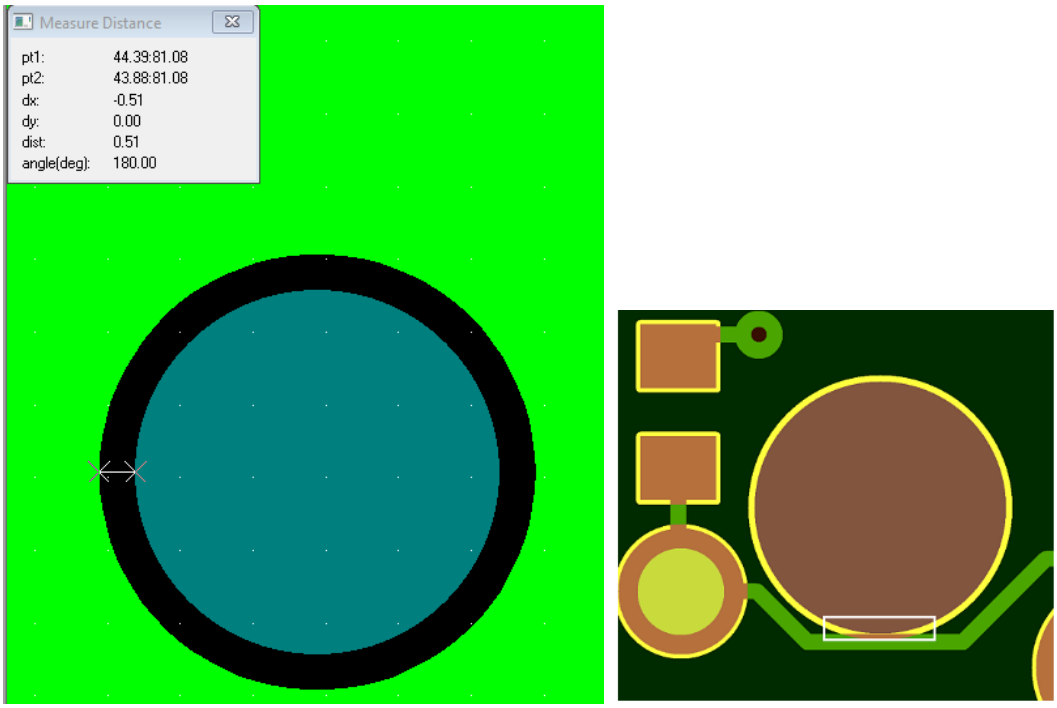

Рисунок 37 – измерение расстояния от топологиии до края не металлизированного отверстия и образец топологии из 3D модели РЭП.

В результате внедрения предложенного алгоритма время определения топологии вблизи не металлизированных краев плат сокращено с 10 минут до 2 минут, а количество ошибок ввиду «человеческого фактора» сокращено на 2%.

Алгоритм измерения расстояния от топологии до не металлизированных отверстий возможно реализовать в виде программного обеспечения на языке программирования VBA, используя встроенный инструментарий среды CAM350 [104]. При условии корректно выполненных конструкторских работ и вывода gerber-файлов алгоритм будет иметь вид, представленный на рисунке 38.

Алгоритм, представленный на рисунке 38 [105], позволяет автоматизировать проверку на отступы от не металлизированных отверстий. В случае, если в ходе проверки в композитных слоях не удаляются важные участки цепи, а вносятся только «косметические» правки в виде, например, создания отступа от растрового полигона, слой можно принять за основной, удалив при этом исходный. Таким образом, в частных случаях алгоритм не автоматизирует процесс, а полностью исключает действия со стороны ЛПР.

Рисунок 38 – Алгоритм проверки отступов от не металлизированных отверстий.

Типичной проблемой является отсутствие проверки на наличие масочных перемычек между площадками устанавливаемых компонентов при конструировании. Наличие перемычек и их ширина непосредственно влияет на себестоимость изготовления изделия. В подавляющем проценте зафиксированных событий обнаружено наличие недостаточного расстояния между площадками. На обнаружение и устранение подобных ошибок конструирования тратится большое количество времени. Для автоматизации данной операции создана методика автоматической корректировки корпусов, представленная на рисунке 39. На вход алгоритма предоставляются слои топологии и файлы «Pick and Place» (PNP). На основе предоставленных данных определяются площадки под выводы микросхемы и расстояние между ними.

Рисунок 39 – Алгоритм корректировки корпусов

На рисунке 40 представлено расстояние, достаточное для возможности формирования масочной перемычки между контактными площадками SMD компонентов.

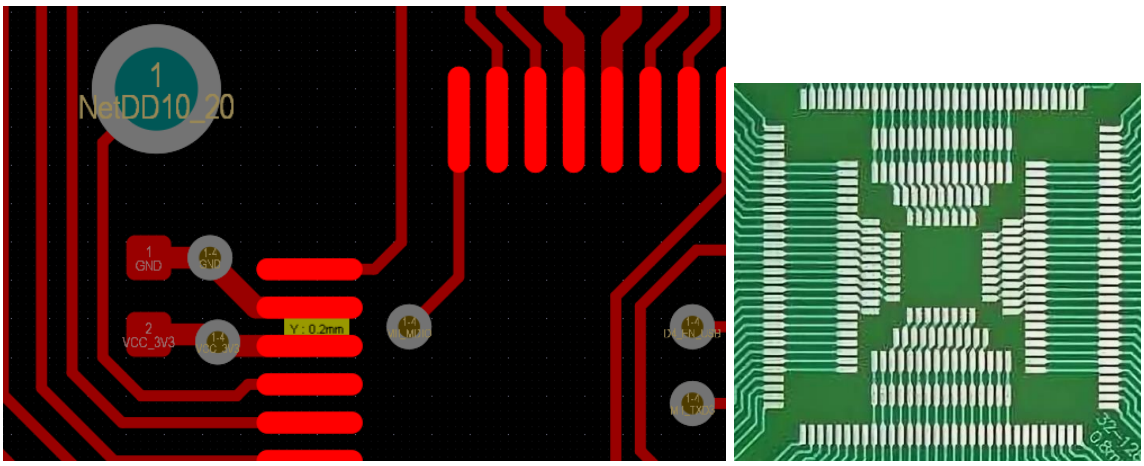

Рисунок 40 - измерение расстояния между контактными площадками SMD компонентов и образец посадочного места на печатной плате.

Одним из обязательных требований для автоматического монтажа является наличие реперных знаков на ПП. В основном на этапе конструирования данные элементы не добавляются, зафиксированы случаи наличия данных знаков на ПП, неподходящих по параметрам. Таким образом, выбор места и размещение реперных знаков на плате определяет производственный отдел, исходя из установленных стандартами требований. Методика автоматизации описанных действий представлена на рисунке 41.

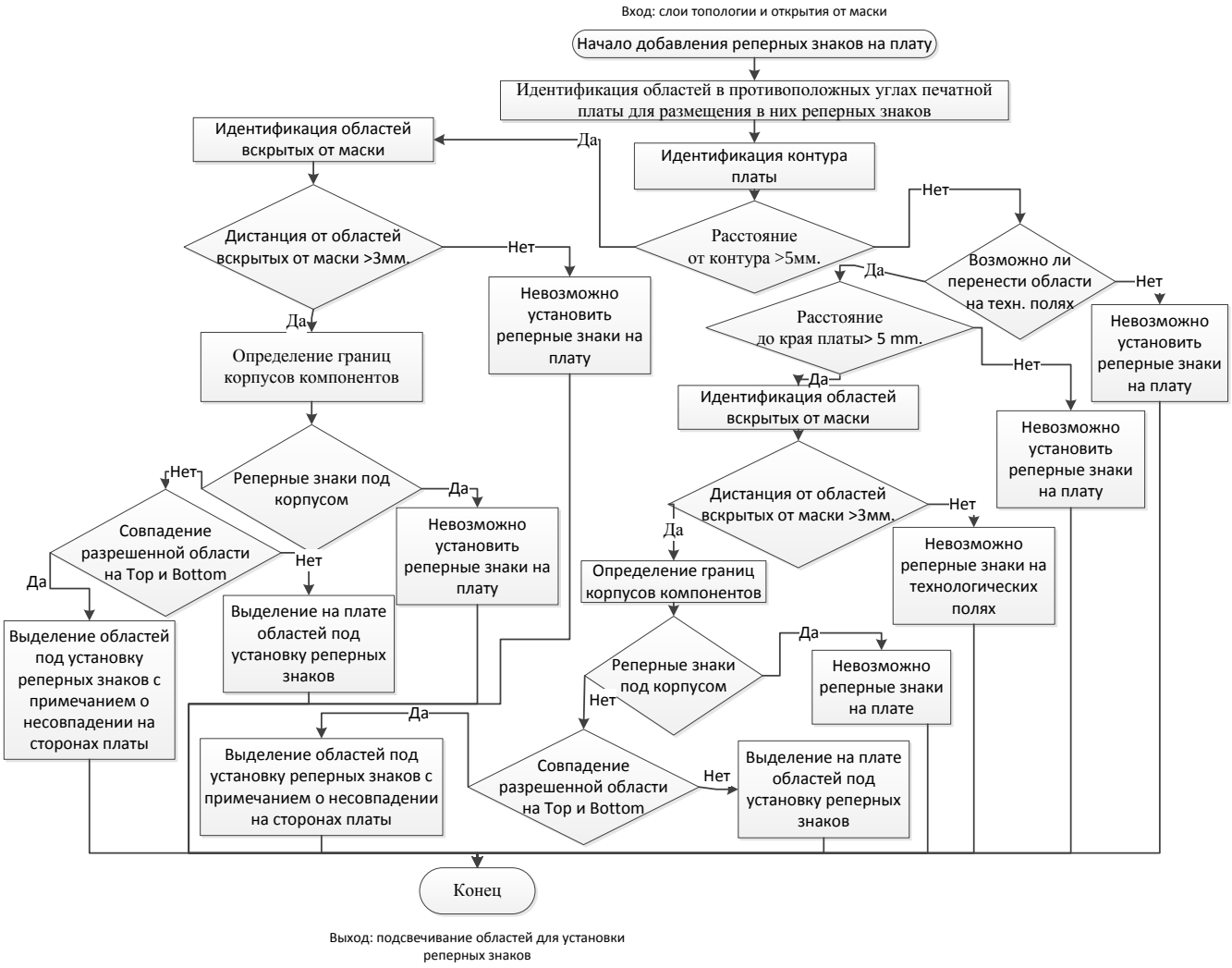

Рисунок 41 – Алгоритм автоматизации установки реперных знаков на печатную плату

В случае наличия технологических полей у заготовки предложенный алгоритм автоматически располагает реперные знаки на заготовке в стандартном месте.

На рисунке 42 представлен пример размещения глобальных и локальных реперных знаков на технологической заготовке печатных плат для проведения SMT монтажа.

Рисунок 42 – пример размещения реперных знаков на технологической заготовке для автоматического монтажа печатных плат.

Обоснование выбора технологии монтажа печатных плат имеет как экономическую составляющую, так и возможность применения того или иного вида пайки. Подавляющее число электронных изделий на сегодняшний день имеет двусторонний монтаж, что приводит к невозможности применения пайки волной [106], но и не исключает применение селективного монтажа. Для применения селективной пайки достаточно соблюдать расстояние от чип-компонентов до отверстий под THT монтаж. В случае возникновения ошибки при определении расстояния от чип-компонентов до штыревых паек возникают следующие последствия:

1. Корректировка программы непосредственно после запуска монтажа;
2. Повреждение установленных ранее SMD компонентов;

3. Повторная установка компонентов вместо поврежденных.

Помимо вышесказанного на анализ ручным методом тратится много времени, кроме того, высок риск появления несоответствий по причине «человеческого фактора». В рамках данной работы была разработана методика определения компонентов, неудовлетворяющих требованиям для проведения селективного монтажа (рисунок 43). В данном случае автоматизировать процесс возможно только посредством диалога ЭВМ-человек, ввиду трудноформализуемости процесса, так как конечное решение остается за лицом, принимающим решение. На вход предложенного алгоритма предоставляются PNP отверстий и паттерны компонентов с габаритными размерами.

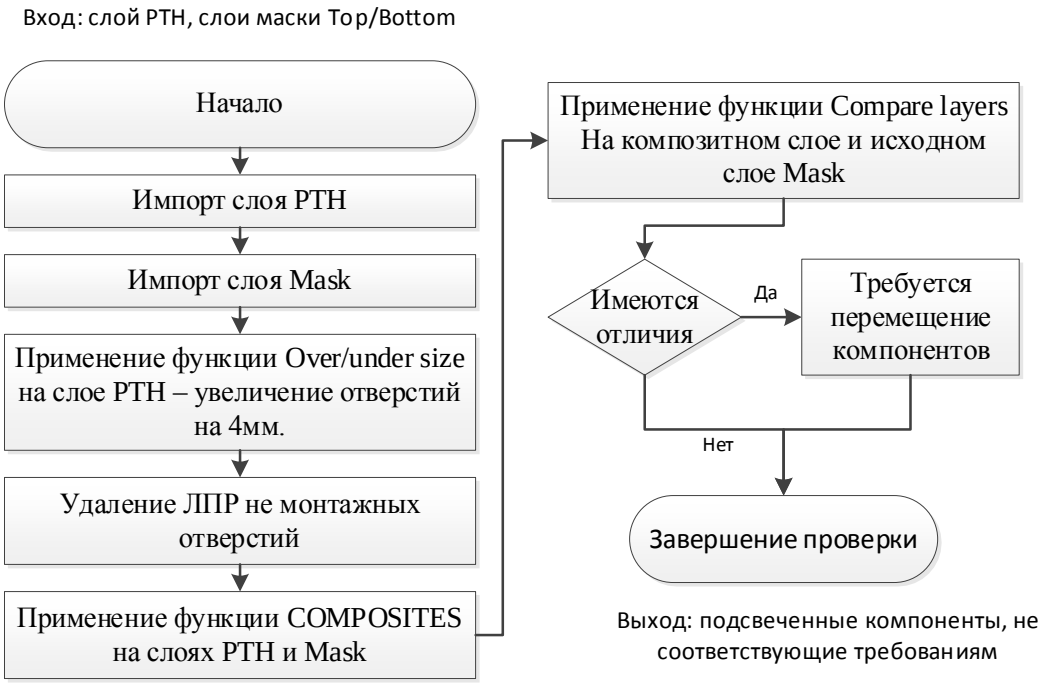

Рисунок 43 – Алгоритм автоматизации процесса адаптации платы под селективную пайку

На рисунке 44 представлен метод измерения расстояния SMD компонентов от штыревых отверстий. Расстояния, изображенного на примере, недостаточно для проведения селективной пайки.

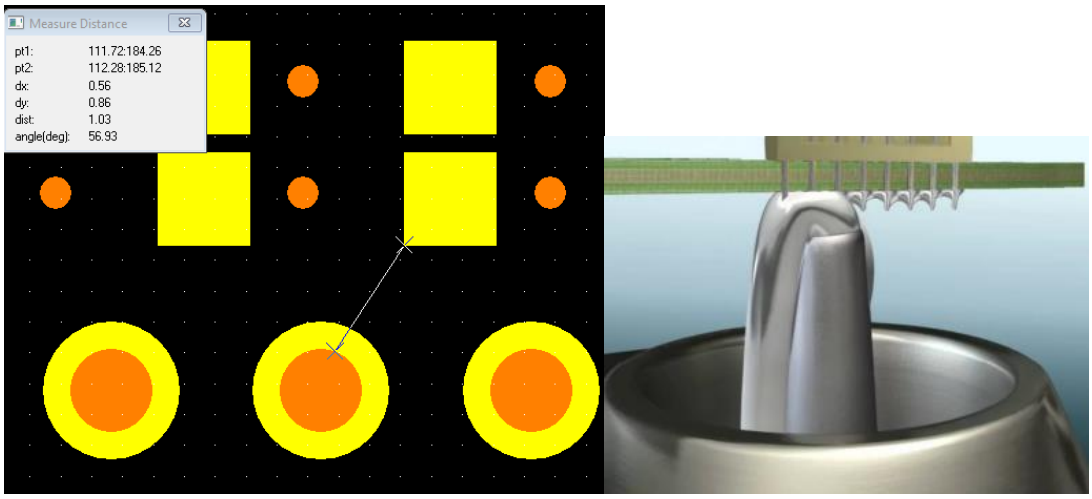

Рисунок 44 – измерение расстояние между краем монтажного отверстия и SMD компонентом. 3D вид селективной пайки штыревого компонента.

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 компонентов и время разделения.

Предпочтительным методом механической обработки заготовок является скарайбирование, ввиду простоты разделения смонтированных плат, так как при разделении заготовок с наличием перфорации велик риск повреждения комплектующих изделий (КИ). На рисунке 45 представлена методика обозначения частей контура для скрайбирования. Результат внедрения: снижение времени разметки с 10 минут до 2 минут. На вход алгоритма предоставляются данные о слоях контура платы и топологии.

Рисунок 45 – Алгоритм автоматизации процесса разметки обработки контура печатных плат

На рисунке 46 представлен пример обработки контура печатных плат методом скрайбирования.

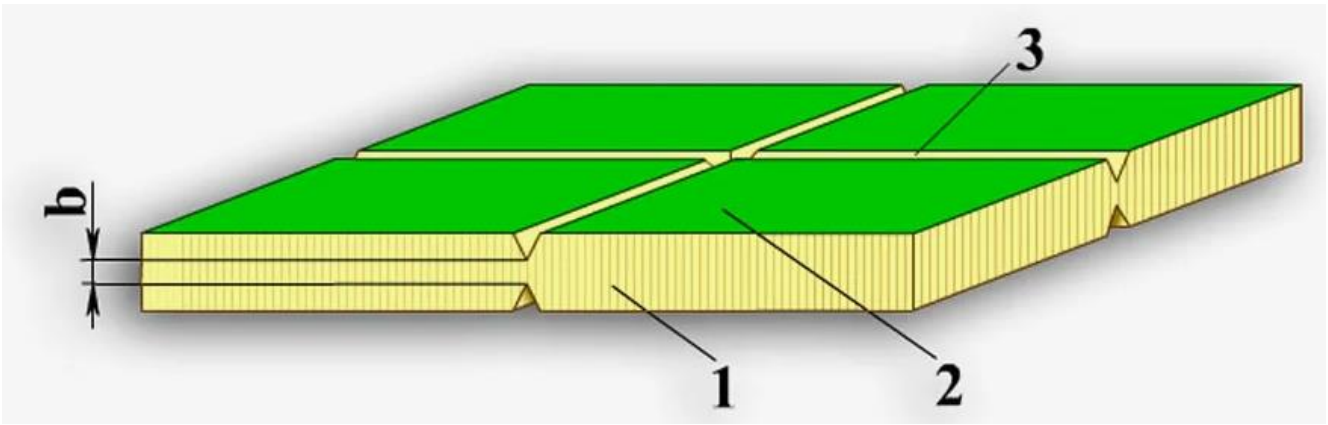

Рисунок 46 – Размещение линий скрайбирования на технологической заготовке для автоматического монтажа печатных плат

Обозначения на рисунке:

— 1 – Линия скрайбирования, разделяющая одиночные печатные платы на заготовке

— 2 – Печатная плата

— b – Остаточная толщина материала, за счет которой осуществляется поддержка технологической заготовки до завершения SMT монтажа.

В процессе анализа печатных плат может быть выявлено наличие переходных отверстий в контактных площадках. Причинами подобного конструкторского решения могут быть как необходимость приведения конструкции к получению необходимых 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 печатных плат. Сложность монтажа заключается в том, что при нанесении пасты методом трафаретной печати и последующей установке 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 печатных оснований.

Для анализа и выявления указанных отверстий на вход алгоритма предоставляются: негативный слой открытия от маски и координаты переходных отверстий.

В случае ошибки на данном этапе значительно повышаются трудозатраты. Для минимизирования влияния «человеческого фактора», а также снижения времени анализа ПП разработан алгоритм, представленный на рисунке 47.

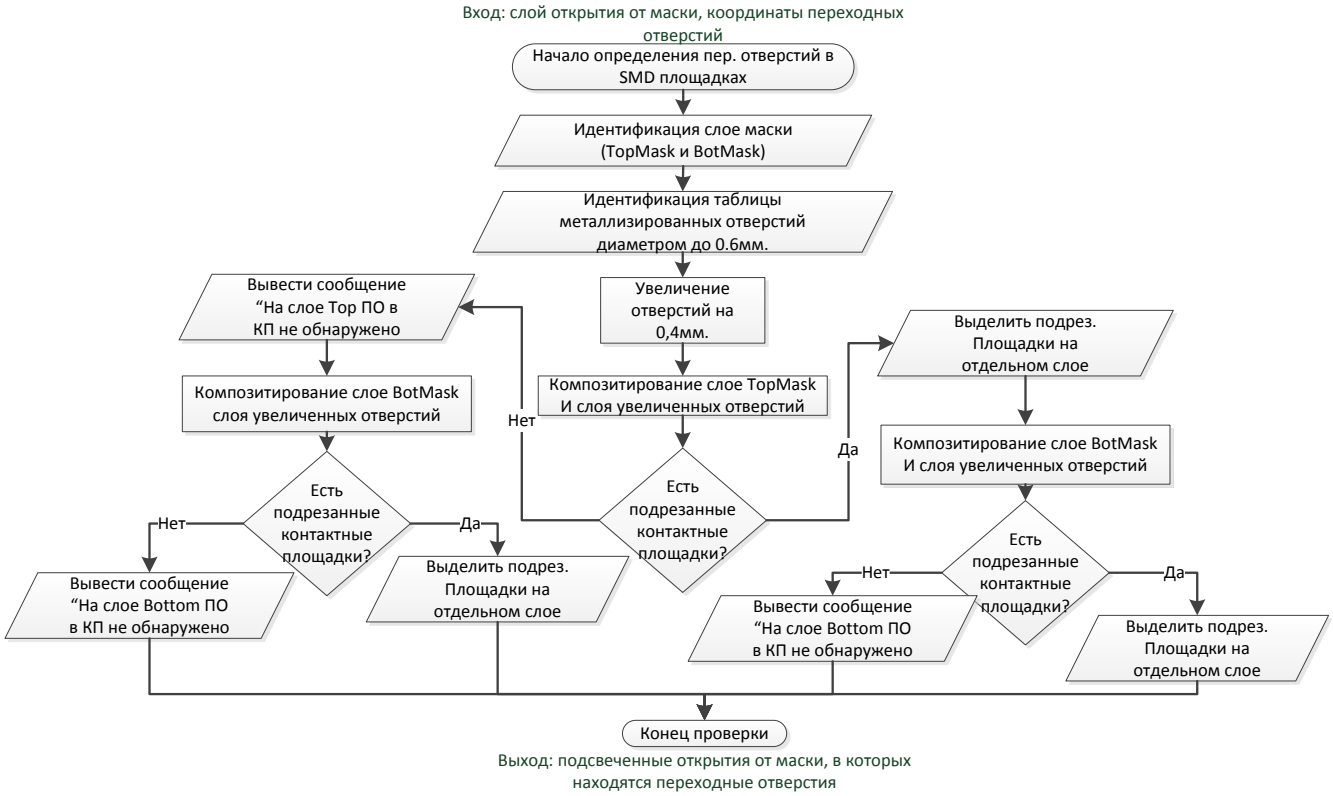

Рисунок 47 - Алгоритм определения переходных отверстий в контактных площадках

На рисунке 48 слева представлено расположение переходных отверстий, которое не обеспечивает качественную пайку на автоматической линии. Справа представлены необходимые расстояния, при которых припой не вытекает в переходные отверстия и обеспечивается паяное соединение согласно IPC 610.

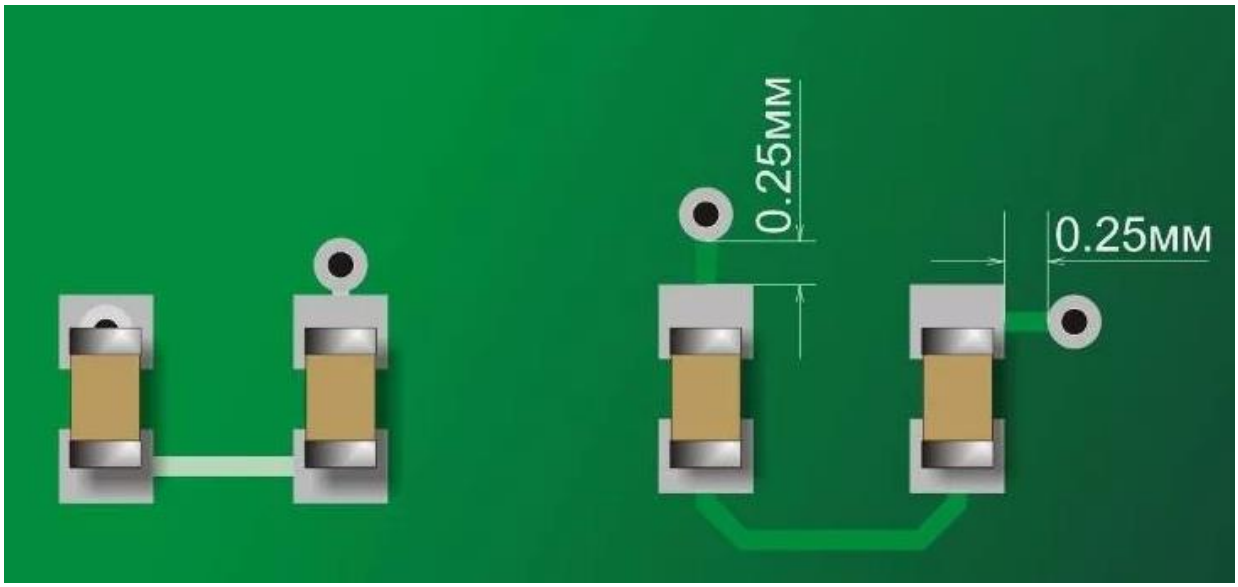

Рисунок 48 – Расположение переходных отверстий на печатной плате

Определение переходных отверстий в контактных возможно реализовать в виде алгоритма для языка программирования VBA с помощью использования инструментария, встроенного в программное обеспечение CAM350 [101].

Подобно алгоритму измерения недостаточного расстояния от топологии до не металлизированных отверстий существует возможность выполнения автоматизированной проверки на наличие переходных отверстий в контактных площадках (КП) с использованием композитных слоев. Однако, в данном случае перед запуском алгоритма проверки от ЛПР потребуется внесение некоторых изменений в слои топологии.

Для подготовки алгоритма проверки на наличие переходных отверстий в КП ЛПР необходимо определить слои, на которые устанавливаются планарные компоненты: верхний слой топологии (TOP), нижний слой топологии (Bottom). Дальнейшие действия необходимо провести для каждого слоя топологии, на который будут устанавливаться компоненты (действия приведены для программного обеспечения CAM350):

1. Используя функцию «over/undersize» увеличить все элементы топологии, имеющие тип «flash» на стандартное значение открытия маски 0,1мм.;

2. Удалить с созданного слоя (в зависимости от количества монтируемых сторон ПП: слой 1 и слой 2) все dcode, используемые для переходных, монтажных и крепежных отверстий, а также иные элементы, не относящиеся к КП планарных компонентов.

После выполнения, указанных действий с топологией, необходимо скопировать на новый слой (слой 3), используемый для проверки, все переходные отверстия, при этом преобразовав их в графические элементы. После выполнения указанных действий алгоритм автоматического поиска переходных отверстий в КП готов к запуску.

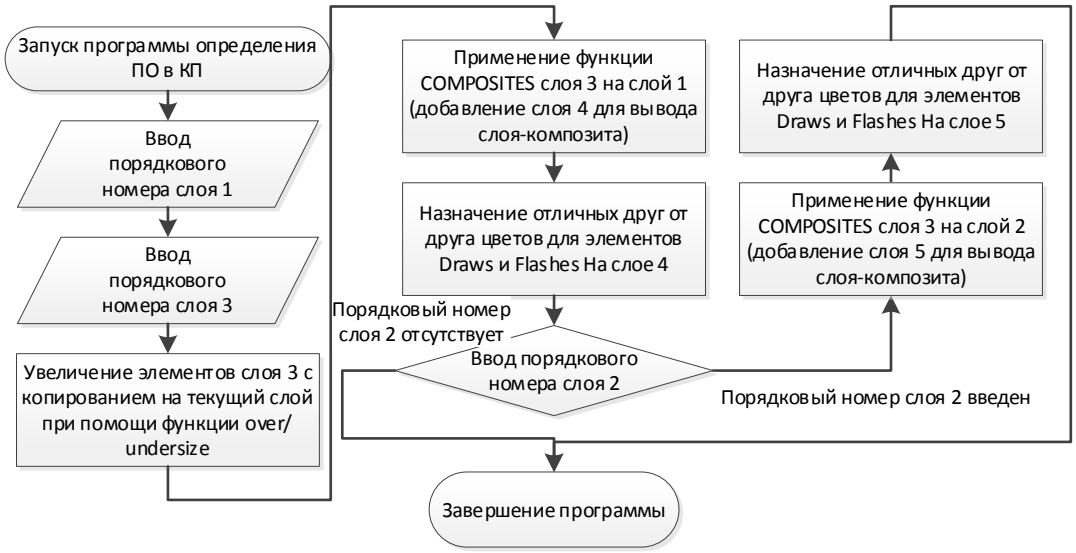

Рисунок 49 – алгоритм автоматической проверки наличия ПО в КП.

В ходе выполнения алгоритма, приведенного на рисунке 49, все flash элементы, подверженные изменению при применении функции COMPOSITES преобразуются в элементы draws. Для элементов draws на слоях-композитах программа автоматически назначает отличные от элементов flash цвета, что позволяет ЛПР проанализировать необходимость заполнения отверстий с последующей металлизацией для повышения количества выхода годных изделий после прохождения автоматического монтажа.

3.2.Методика автоматизированного формирования параметров компонентов радиоэлектронной продукции на основе интеграции с базами технологических данных

Мировая ситуация с ЭКБ приводит к необходимости непрерывной актуализации доступности КИ и внесения изменений в КД РЭП. Любое изменение КД в рамках контрактного производства приводит к необходимости проведения повторного анализа КД изделия. Наиболее объемной составляющей печатных плат является комплектация.

При анализе монтажа ЭКБ на печатную плату проводится полная проверка каждого номинала из спецификации и фиксирование его технических параметров для последующего сводного анализа. Данная рутинная операция повышает

нагрузку на инженерный отдел. Например, для анализа сборки материнской платы, ввиду объема устанавливаемых номиналов, тратится порядка 3 часов. По причине необходимости оперативного анализа и внесения корректировок высок риск появления ошибок из-за влияния «человеческого фактора», а как следствие – экономические потери и увеличение трудоемкости.

В настоящее время существует три основные методики анализа монтажа ЭКБ на печатные платы:

Подсчет методом генерации Report данных CAD. Методика №1.

Время проведения анализа – 3 минуты.

Достоверность данных: низкая по причине отсутствия возможности учета переменных данных для исполнений РЭП и некорректного назначения типов элементов в CAD-проектах.

Состав операций: сгенерировать данные CAD, из полученных данных вычесть элементы, не являющиеся паяными соединениями, которые явно выделяются на печатной плате.

Подсчет методом экспертного исключения элементов CAM-проекта, не относящихся к паяным соединениям (крепежные отверстия, открытия полигонов на СВЧ-печатных платах и т.д.) Методика №2.

Время проведения анализа – 10 минут.

Достоверность данных: низкая – все действия проводятся ЛПР вручную, в условиях большого количества паяных соединений и неоднородности топологии приводит к ошибкам в подсчетах.

Состав операций: удалить на слоях с негативным отображением масочного покрытия элементы, не относящиеся к паяным соединениям, функцией delete удалить оставшиеся элементы, получив при этом их количество.

Подсчет параметров по спецификации. Методика №3.

Время проведения анализа – 3 часа.

Достоверность данных: высокая, т.к. расчет ведется для конкретного исполнения РЭП, а каждый компонент рассматривается отдельно.

Состав операций: спецификация переносится в удобный для обработки формат (.xls), для каждого номинала указывается количество выводов под пайку, все нестандартные корпуса и типоразмеры отмечаются отдельно для определения сложности монтажа.

В целях снижения влияния «человеческого фактора», а также сокращения времени анализа и освобождения кадрового ресурса для решения других задач в рамках данной работы предложена методика автоматического анализа технических параметров ЭКБ.

Подсчет параметров при помощи методики научного положения №4. Методика 4.

Время проведения анализа – 5 минут. (в случае наличия ЭКБ из состава РЭП в БД)

Достоверность данных: высокая, т.к. расчет ведется для конкретного исполнения РЭП, а каждый компонент рассматривается отдельно.

Состав операций: указать путь к файлу спецификации в формате «.xls», дополнить технические параметры, в случае отсутствия партномера в БД, добавить параметры ЭКБ, отсутствующей в БД.

На рисунке 50 представлено сравнение описанных методик. Наиболее достоверным, но в то же время самым трудозатратным является анализ путем фокусного верификации каждого номинала в спецификации РЭП. Менее трудозатратные методики являются недостоверными и могут привести к некорректному определению технологии монтажа и, как следствие, срыву сроков производства.

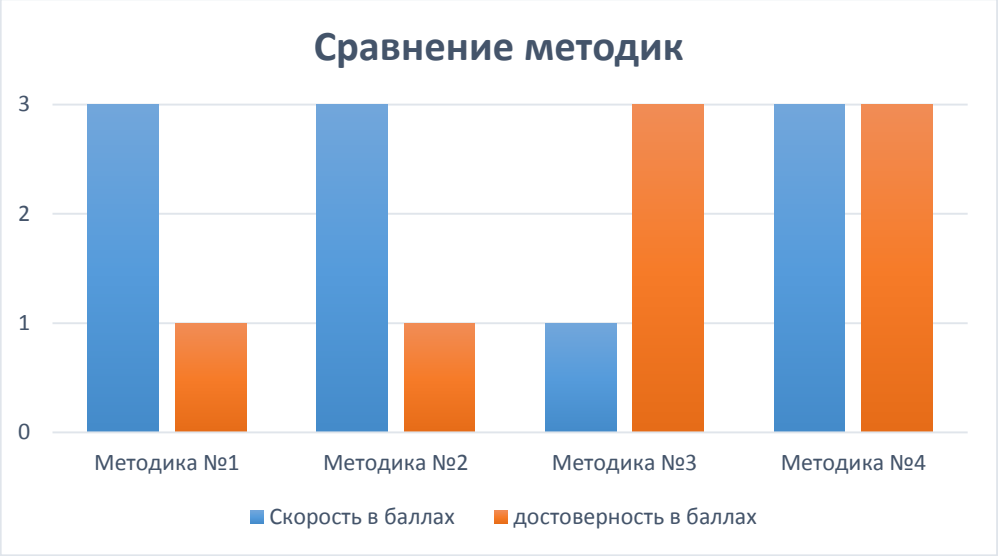

Рисунок 50 – Сравнение методик анализа монтажа РЭП

Разработанный алгоритм в своей программной реализации осуществляет обработку информации в формате .xlsx при помощи библиотеки openpyxl [107]. Графический дизайн для конечного пользователя реализован при помощи библиотеки tkinter [108]. Программа позволяет анализировать каждый номинал в спецификации электронного изделия при помощи базы данных ЭКБ, что позволяет исключить рутинный подсчет параметров инженерами и оперативно получить необходимые данные [109-114]:

1. Количество паяных соединений с разбивкой на SMD и THT монтаж;
2. Количество сложных корпусов (BGA, LGA, QFN) и количество их номиналов;
3. Количество пассивных компонентов миниатюрных типоразмеров (меньше 0603);
4. Количество нестандартных компонентов, которые влияют на технологический процесс, например, наличие переключателей.

После заполнения перечисленных данных, производится подсчёт параметров и вывод оператору сводной информации по изделию. На основе полученной информации появляется возможность в минимальные сроки определить вид технологии монтажа радиоэлектронной продукции, ресурсы с учетом классификации персонала, а также экономические показатели монтажных работ. Информация, предоставляемая программой, является точной, так как

заполняется непосредственно по спецификации изделия, что является более предпочтительным вариантом расчета, по сравнению с получением report данных из CAD-программ.

При внедрении разработанного алгоритма время подсчета для материнских плат сократилось с 3 часов до 10-27 минут в зависимости от количества компонентов, хранящихся в базе данных. Упрощенный алгоритм программы представлен на рисунке 51.

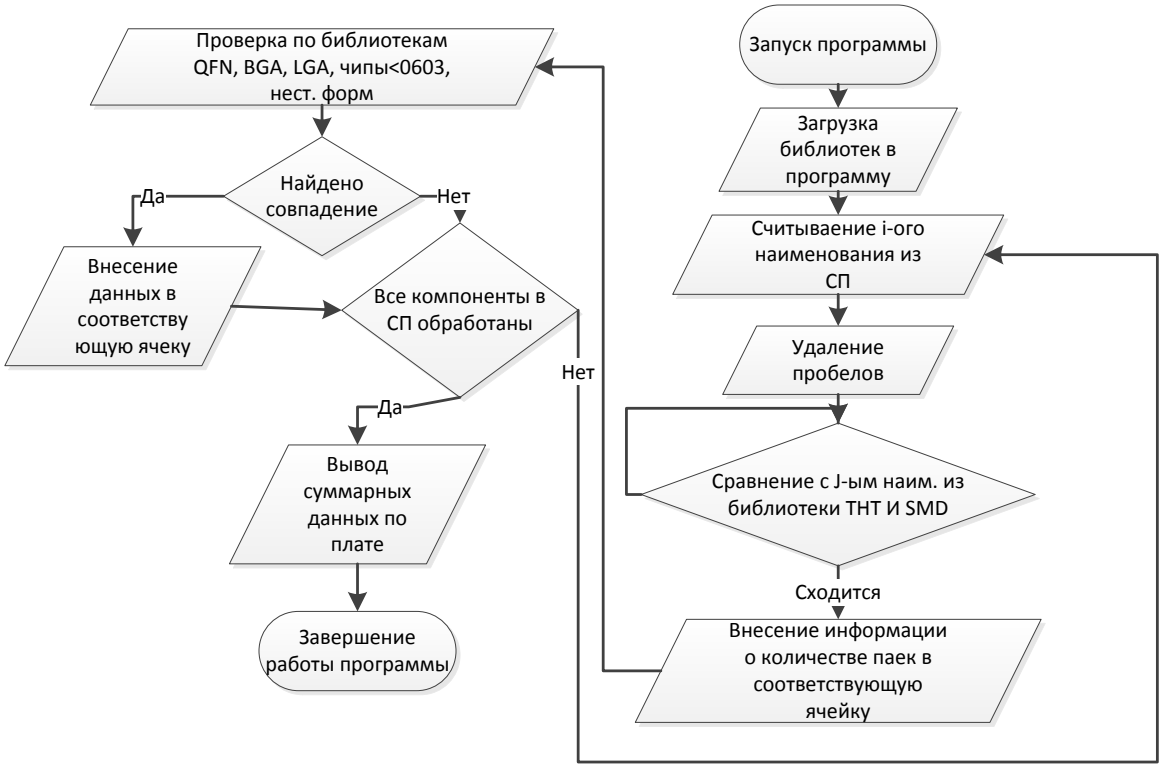

Рисунок 51 – Алгоритм подсчета параметров монтажа при помощи базы данных

Представленный алгоритм проводит автоматически анализ, для запуска оператору требуется только указать путь и название файла спецификации изделия (рисунок 52).

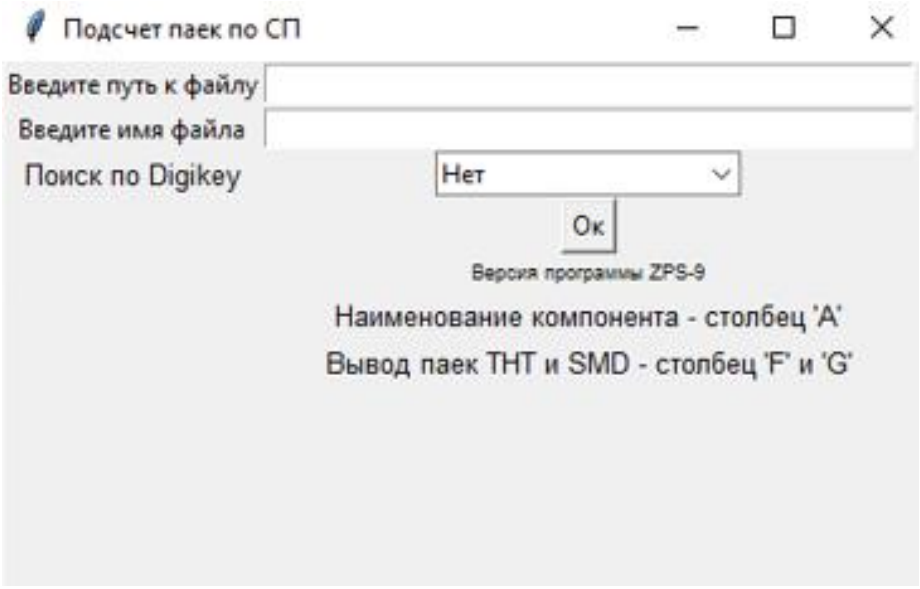

Рисунок 52 – графический интерфейс программы

В таблице 19 представлены исходные данные, необходимые для запуска программы: наименование (part number) и применимость на изделие. Данная информация содержится в спецификации РЭП. Результатами работы являются:

— заполнение таблицы паяных соединений с разбивкой на тип монтажа;

— Определение «сложных» корпусов: BGA, LGA, QFN;

— Определение малогабаритных компонентов типоразмером менее 0603.

Таблица 19 – Исходные данные для запуска программы

Наименование	**Количество**	**THT**	**SMD**	**BGA**	**LGA**	**QFN**	**Чип <0603**
MPL3115A2	4		8		8		
IIS2DHTR	7		12		12		
LSM303AGR	6		12		12		
LIS2DH12TR	9		12		12		
TLV320ADC3101	3		25				
BZX55C 18V	1	2					
BZX55C 22V	1	2					
ADS8638SRGE	4		25				
SWT-4	1	4					
MAXM17546ALY#	2		29		29		

Конечным результатом программы является предоставление оператору сводных данных технологических параметров РЭП (представлены в таблице 20):

1. Суммарное количество паяных соединений:

— Для выводного монтажа;

— Для поверхностного монтажа;

— BGA корпусов;

— LGA корпусов;

— QFN корпусов;

— Малогабаритных компонентов.

2. Суммарное количество номиналов указанных выше компонентов

3. Суммарное количество указанных выше компонентов

Таблица 20 – Выходные данные программы.

Параметр	**THT**	**SMD**	**BGA**	**LGA**	**QFN**	**Чип-компоненты <0603**
Количество паек	8	529	0	354	0	0
Количество номиналов	3	7	0	5	0	0
Количество компонентов	3	35	0	28	0	0

На основе анализа сводных данных производство электроники может получить следующую информацию:

— Необходимость выполнения работы конкретным классом кадрового состава, имеющим требуемые навыки

— Срок монтажа изделий;

— Стоимость монтажа изделий;

— Необходимые технологии для монтажа изделий.

Мировые библиотеки комплектующих изделий имеют большое количество наименований. В случае расчета параметров похожих по применению изделий, либо новых итераций изделий разработанный алгоритм показывает положительные результаты и способен определить 60-90% комплектации. Однако, в условиях контрактного среднесерийного и опытного производства

номенклатура изделий сильно отличается друг от друга, что значительно снижает количество совпадений спецификации с базой данных.

3.3. Методика автоматического определения параметров ЭКБ с использованием сетевых ресурсов

Как было заявлено ранее, при контрактном производстве представленный в разделе 3.2 алгоритм может показывать неудовлетворительные результаты идентификации комплектующих изделий. Связано это с разным назначением устройств и т.д. На рисунке 53 представлена сводная статистика по существующей на сегодняшний день номенклатуре ЭКБ.

Точное количество уникальных партномеров ЭКБ в мире установить невозможно из-за динамичности рынка, но можно оценить порядок величин и ключевые факторы:

1. Оценочные данные

1.1 Производители: Более 1,000 компаний (TI, STM, Infineon, NXP, Murata и др.).

1.2 Активные партномера:

— ~10–30 млн уникальных номеров (с учётом модификаций, корпусов, характеристик).

— Базы данных: Например, Findchips содержит данные о ~444 млн позиций (включая дубликаты и устаревшие версии компонентов).

1.3 Ежегодный прирост: ~1–2 млн новых номеров (технологии, аналоги, кастомизация).

2. *Причины изменения количества партномеров*

— Модификации: Одна микросхема может иметь 10+ вариантов (корпус, рабочая температура, упаковка).

— Аналоги: Разные бренды выпускают аналоги под своими партномерами (например, LM358 ↔ KA358).

— Устаревшие компоненты: До 40% партномеров в базах — исторические (снятые с производства).

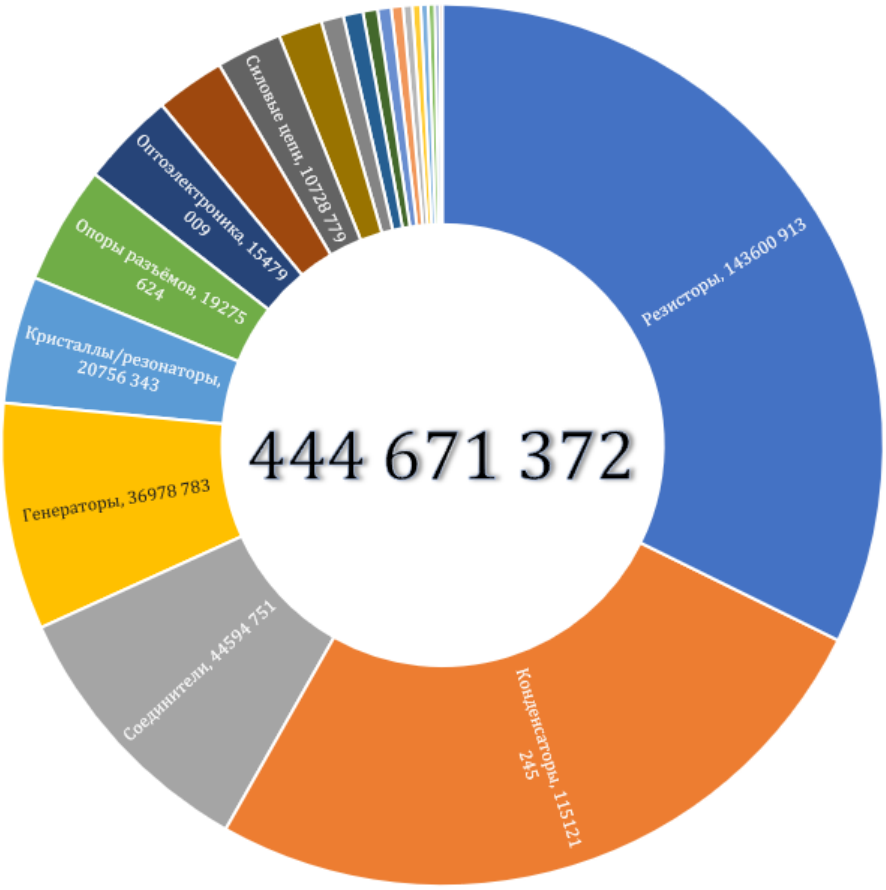

Рисунок 53 – Анализ существующей номенклатуры ЭКБ

В связи с вышесказанным предложенная в рамках раздела 3.2 методика была модернизирована: для повышения количества определяемых компонентов в алгоритме реализован модуль запроса информации посредством использования сетевых ресурсов (рисунок 54) на базе использования библиотеки selenium [115].

После сравнения с базой данных алгоритм прорабатывает неопределенные компоненты [105-110], запрашивая информацию на сетевых ресурсах и занося ее в специальные ячейки. После получения необходимой информации алгоритм заносит параметры в БД.

Рисунок 54 – парсинг по каталогам мировых поставщиков комплектации

3.4. Результаты и выводы по разделу 3

В разделе 3 предложены алгоритмы автоматизации процессов, повышающие качество предпроизводственных процессов, которые трудно формализовать в конкретный порядок действий, исключая контроль со стороны ЛПР. Все представленные алгоритмы являются отдельными составляющими методики автоматизации трудноформализуемых предпроизводственных процессов ЖЦ РЭП. На основе внедрения указанных методик достигается повышение качества конечного изделия за счет снижения возможных несоответствий в процессе производства.

В результате внедрения методик, разработанных в рамках 3-го научного положения, удалось снизить процент несоответствующих стандарту IPC-610 паянных соединений.

Результат пересчета значений, представленных в разделе 2.3, продемонстрирован на рисунке 55 и составляет 2,18% (процент улучшения выхода годных на 0,01%):

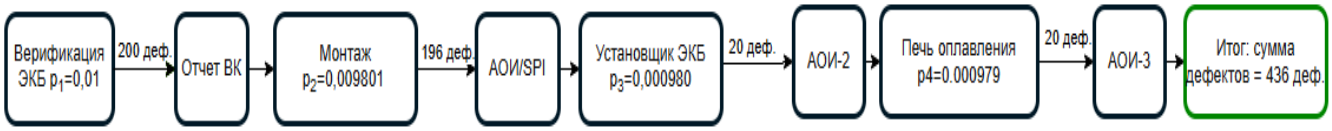

Рисунок 55 – Результат внедрения методик автоматизации трудноформализуемых операций предпроизводственной подготовки.

Положительный результат внедрения описанных методик представлен в таблице 21.

Таблица 21 – Результаты внедрения методики автоматизации трудноформализуемых процессов технологической подготовки производства.

Наименование параметра	**До внедрения НП№3**	**После внедрения НП№3**	**Значение параметра**
Время разметки линий скрайбирования	10,4 мин.	7,3 мин.	Сокращено на 3,1 мин.
Время корректировки посадочного места	12,3 мин.	8,6 мин.	Сокращено на 3,7 мин.

Продолжение таблицы 21

Наименование параметра	**До внедрения НП№3**	**После внедрения НП№3**	**Значение параметра**
Время определения топологии вблизи не металлизированных краев ПП	12,1 мин.	6,9 мин.	Сокращено на 5,2 мин.
Время определения компонентов под селективную пайку	11,3 мин.	6,3 мин.	Сокращено на 5 мин.
Время размещения реперных знаков на ПП (в случае наличия технологических полей)	11,5 мин.	7,1 мин.	Сокращено на 4,4 мин.
Процент несоответствий при определении чипов в зоне селективной пайки	3%	1%	Снижено на 2%
Процент несоответствий при размещении реперных знаков	2%	1%	Снижено на 1%
Процент несоответствий при определении топологии вблизи отверстий без металлизации	3%	1%	Снижено на 2%
Процент несоответствий по причине человеческого фактора	20%	15%	Снижено на 5%

Методика автоматизации процессов предпроизводственной подготовки РЭП позволяет сократить время проведения определенных операций предпроизводственной подготовки на 37% и снизить уровень несоответствий при проведении анализа топологии печатной платы из состава РЭП на 10%.

На текущий момент существует три методики оценки количественных показателей: ручная оценка по спецификации РЭП, приблизительная оценка по report данным CAD и экспертному удалению «лишних» данных в CAM. Первая методика дает точную оценку технологических параметров РЭП, однако занимает

ориентировочно 3 ч. для анализа серверных материнских плат. Остальные методики предоставляют данные с большой погрешностью, однако занимают ориентировочно 10 мин. на изделие.

При условии наличия в БД информации о применяемой ЭКБ, предложенная в рамках научного положения №4 методика позволяет проводить автоматическую оценку КД РЭП в минимально возможные сроки (10-27 мин), предоставляя точные данные о технологических параметрах РЭП.

В результате внедрения предложенной методики достигнуты результаты, представленные в таблице 22:

Таблица 22 – Результаты внедрения алгоритма.

Наименование критерия	**Значение параметра**
Время оценки сложности монтажа	Снижено с 10 мин. До 1мин.
Количество несоответствий при определении сложности монтажа	Снижено на 3%
Количество несоответствий при заполнении параметров	Снижено на 12%
Время анализа ЭКБ	Снижено с 3ч. до 10-27 мин.

Методика автоматизированного формирования параметров компонентов радиоэлектронной продукции на основе интеграции с базами технологических данных позволяет сократить время анализа количественных показателей РЭП на 85-94% и снизить количество несоответствий на 12% при условии наличия в БД компонентов из состава РЭП.

Методика автоматического определения параметров ЭКБ с использованием сетевых ресурсов позволяет сократить время анализа количественных показателей РЭП на 85-94% и снизить количество несоответствий на 12%. Предложенная в рамках научного положения №5 методика позволяет непрерывно обновлять базу данных посредством использования сетевых ресурсов. Благодаря этому достигаются результаты,

представленные в таблице №22 даже при отсутствии информации в БД программы.

Таким образом, в рамках данной работы сформированы следующие научные положения, выносимые на защиту:

1. 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;

2. 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;

3. 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, выполняемых вручную.

Заключение

В настоящей 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 сокращения затраченного времени на выполнение 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. Предложена модификация обобщённой математической модели оценки качества, специализированная для этапа комплектования ЭКБ, отличающаяся от уже 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 радиоэлектронной продукции, 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 печатной

платы 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.

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, полученными автором от «ПАНТЕС», АО «НИИ «Масштаб», ООО «НПФ «Торэкс», ФГАОУ ВО «ГУАП».

Список сокращений и условных обозначений

BGA - ball grid array

CAD - computer-aided design

CAM - computer-aided manufacturing

DFM - design for manufacturability

DRC - design Rule Checking

LGA - land Grid Array

PNP - pick and Place

QFN - quad Flat No-leads

АОИ - автоматическая оптическая инспекция

АУК - автомат установки компонентов

ЖЦ - жизненный цикл

КД - конструкторская документация

КИ - комплектующие изделия

КП - контактная площадка

ЛПР - лицо, принимающее решение

МК - микроконтроллер

ОЭЗ - особая экономическая зона

ПВРСВ - плотность вероятности распределения случайной величины

ПВРСФ - плотность вероятности распределения случайных функции

ПП - печатная плата

РЭП - радиоэлектронная продукция

СКО - среднеквадратическое отклонение

ТЗ - техническое задание

ТПП - технологическая подготовка производства

ЭВМ - электронно-вычислительная машина

ЭКБ - электронная компонентная база

ЭРИ - электрорадиоизделия

Список литературы

1. Постановление правительства РФ «Об утверждении перечня электронной (радиоэлектронной) продукции для целей применения пониженных налоговых ставок по налогу на прибыль организаций и тарифов страховых взносов» [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации. — URL: http://government.ru/docs/all/142362/ (дата обращения: 20.05.2024).

2. Распоряжение Правительства РФ от 17.01.2020 № 20-р «Об утверждении Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года» [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации. — URL: http://government.ru/docs/38795/ (дата обращения: 20.05.2024).

3. Постановление Правительства РФ от 27.03.2023 № 486 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации» [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал Правительства РФ. — URL: http://static.government.ru/media/files/GfvsHaHXDZSthzHIIljWN90DF5rJ2F9l.pdf (дата обращения: 20.05.2025).

4. Федеральный закон от 22.07.2005 № 116-ФЗ «Об особых экономических зонах в Российской Федерации» [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации. - URL: http://government.ru/docs/all/97953/ (дата обращения: 20.05.2025).

5. Understanding DFM: A Guide for Design and Manufacturing [Электронный ресурс] // Downstream Technologies. — URL: https://www.downstreamtech.com/downloads/UnderstandingDFM.pdf (дата обращения: 20.05.2025)

6. ГОСТ Р 55490-2013 Платы печатные. Общие технические требования к изготовлению и приемке. — Введ. 2014-07-01. — М.: Стандартинформ, 2013. — 42 с.

7. ГОСТ Р 55491-2013 Платы печатные. Правила восстановления и ремонта. — Введ. 2014-07-01. — М.: Стандартинформ, 2013. — 28 с.

8. ГОСТ Р 55693-2013 Платы печатные жесткие. Технические требования. — Введ. 2014-07-01. — М.: Стандартинформ, 2013. — 36 с.

9. ГОСТ Р 55744-2013 Платы печатные. Методы испытаний физических параметров. — Введ. 2014-07-01. — М.: Стандартинформ, 2013. — 24 с.

10. ГОСТ Р 56251-2014 Печатные платы и классификации дефектов. — Введ. 2015-07-01. — М.: Стандартинформ, 2014. — 48 с.

11. ГОСТ Р ИСО 9000:2015 Системы менеджмента качества. Требования. — Введ. 2016-07-01. — М.: Стандартинформ, 2015. — 87 с.

12. ГОСТ 2.123-93 Единая система конструкторской документации. Комплектность конструкторских документов на печатные платы при автоматизированном проектировании. — Введ. 1994-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 24 с.

13. ГОСТ 23662-79 Платы печатные. Получение заготовок, фиксирующих и технологических отверстий. Требования к типовым технологическим процессам. — Введ. 1980-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1979. — 12 с.

14. ГОСТ 23752.1-92 (МЭК 326-2-90) Платы печатные. Методы испытаний. — Введ. 1993-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1992. — 18 с. (с Поправкой).

15. ГОСТ 23752-79 Платы печатные. Общие технические условия. — Введ. 1980-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1979. — 32 с. (с Изменениями № 1-5).

16. ГОСТ 23770-79 Платы печатные. Типовые технологические процессы химической и гальванической металлизации. — Введ. 1980-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1979. — 16 с.

17. ГОСТ 30668-2000 Изделия электронной техники. Маркировка. — Введ. 2001-07-01. — М.: Изд-во стандартов, 2000. — 8 с. (с Поправкой).

18. IPC-7095: Design and Assembly Process Implementation for BGAs [Текст]. — 3rd ed. — Bannockburn, IL: IPC, 2017.

19. IPC-7525: Stencil Design Guidelines [Текст]. — Revision A. — Bannockburn, IL: IPC, 2022.

20. IPC-9850: Rating characteristics of the equipment to install the surface mount components [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2002

21. IPC-A-610: Acceptability of Electronic Assemblies [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2022.

22. IPC-AJ-820: Assembly and Joining Handbook [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2020.

23. IPC-2251: Design Guide for the Packaging of High Speed Electronic Circuits [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2021.

24. J-STD-075: Classification of Non-IC Electronic Components for Assembly Processes [Текст]. — Arlington, VA: JEDEC Solid State Technology Association, 2018.

25. IPC-A-600: Acceptability of Printed Boards [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2020.

26. J-STD-609: Marking and Labeling of Components for Identification of Lead (Pb), Pb-Free and Other Attributes [Текст]. — Arlington, VA: JEDEC Solid State Technology Association, 2021.

27. J-STD-004: Requirements for Soldering Fluxes [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2021.

28. IPC-4562: Specification for Metal Base Printed Boards for High Brightness LED Applications [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2020.

29. IPC-TM-650: Test Methods Manual [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2022.

30. IPC-1751: Materials Declaration Management Standard [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2021.

31. J-STD-002: Solderability Tests for Component Leads, Terminations, Lugs, Terminals and Wires [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2023.

32. IPC-SM-840: Qualification and Performance Specification of Permanent Solder Mask [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2019.

33. IPC-7711/21: Rework, Modification and Repair of Electronic Assemblies [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2022.

34. IPC-7525: Stencil Design Guidelines [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2022.

35. J-STD-001: Requirements for Soldered Electrical and Electronic Assemblies [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2023.

36. IPC-4552: Specification for Electroless Nickel/Immersion Gold (ENIG) Plating for Printed Boards [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2021.

37. IPC-9252: Requirements for Electrical Testing of Unpopulated Printed Boards [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2020.

38. Петрова В.М. Автоматизированная система оперативной регистрации технических изменений предприятия радиоэлектронной промышленности [Текст] // Инновации в электронике. — 2021. — Т. 8. — № 3. — С. 45–58. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannaya-sistema-operativnoy-registratsii-tehnicheskih-izmeneniy-predpriyatiya-radioelektronnoy-promyshlennosti/viewer (дата обращения: 20.05.2025).

39. Масштабный Allocation на рынке электронных компонентов [Электронный ресурс] // auroraevernet.ru. — URL: https://auroraevernet.ru/news/allocation_components/ (дата обращения: 20.05.2025).

40. И. Лебедев Анализ рынка конденсаторов, резисторов, диодов, реле, , индуктивности и микроконтроллеров в условиях санкций. [Электронный ресурс] // commarketru.com. — URL: https://commarketru.com/analiz-rynka-kondensatorov-rezistorov-diodov-rele-induktivnosti-i-mikrokontrollerov-v-usloviyah-sankczij/ (дата обращения: 20.05.2025).

41. План мероприятий по импортозамещению в отрасли радиоэлектронной промышленности Российской Федерации [Электронный ресурс]. — 2022. — URL: https://frprf.ru/download/plan-po-importozameshcheniyu-v-radioelektronnoy-promyshlennosti.pdf (дата обращения: 20.05.2025).

42. Иванов А.А. Аспекты импортозамещения радиоэлектронных компонентов в авиационной отрасли [Текст] // Современные технологии. — 2022. — № 5. — С. 12–25. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/aspekty-importozamescheniya-radioelektronnyh-komponentov-v-aviatsionnoy-otrasli/viewer (дата обращения: 20.05.2025).

43. Антохина, Ю. А. Анализ текущей ситуации на рынке производства радиоэлектронных компонентов / Ю. А. Антохина, Е. А. Фролова, А. С. Тур // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов IV Международного форума. - 2024. – С. 119-120.

44. Дозирование паяльной пасты [Электронный ресурс] // Ostec-Smart: публикации. — URL: https://ostec-smart.ru/media/publications/smt/dozirovanie-payalnoy-pasty/ (дата обращения: 20.05.2025).

45. Трафаретная печать паяльной пасты [Электронный ресурс] // Ostec-Smart: публикации. — URL: https://ostec-smart.ru/media/publications/nanesenie-payalnoy-pasty/trafaretnaya-pechat/ (дата обращения: 20.05.2025).

46. Технология Pin-in-Paste (пайка выводных компонентов по SMT-технологии) [Электронный ресурс] // Ostec-Smart: публикации. — URL: https://ostec-smart.ru/media/publications/smt/tekhnologiya-pin-in-paste/ (дата обращения: 20.05.2025).

47. Установка компонентов поверхностного монтажа [Электронный ресурс] // Ostec-Smart: публикации. — URL: https://ostec-smart.ru/media/publications/ustanovka-komponentov/ustanovka-komponentov/ (дата обращения: 20.05.2025).

48. Конвекционная пайка выводных компонентов [Электронный ресурс] // Ostec-Smart: публикации. — URL: https://ostec-smart.ru/media/publications/montazh-vyvodnykh-komponentov/konvektsionnaya-payka/ (дата обращения: 20.05.2025).

49. Пайка в паровой фазе [Электронный ресурс] // Ostec-Smart: публикации. — URL: https://ostec-smart.ru/media/publications/payka-oplavleniem/payka-v-parovoy-faze/ (дата обращения: 20.05.2025).

50. iSpector: автоматическая оптическая инспекция [Электронный ресурс] // Sovtest-ATE. — URL: https://sovtest-ate.com/sites/default/files/iSpector.pdf (дата обращения: 20.05.2025).

51. Обзор системы автоматической оптической инспекции Viscom [Электронный ресурс] // Ostec-Smart: публикации. — URL: https://ostec-smart.ru/media/publications/smt/obzor-sistemy-avtomaticheskoy-opticheskoy-inspektsii-viscom/ (дата обращения: 20.05.2025).

52. Преимущества 3D-измерения в системах контроля нанесения паяльной пасты [Электронный ресурс] // DiPaUL: пресс-центр. — URL: https://dipaul.ru/news/preimushchestva-3d-izmereniya-v-sistemakh-kontrolya-naneseniya-payalnoy-pasty/ (дата обращения: 20.05.2025).

53. Муаровая интерферометрия [Электронный ресурс] // DiPaUL: пресс-центр. — URL: https://www.dipaul.ru/pressroom/muarovaya-interferometriya/ (дата обращения: 20.05.2025).

54. Избежать ремонта: технология процесса [Электронный ресурс] // DiPaUL: новости. — URL: https://dipaul.ru/news/izbezhat-remonta-tekhnologiya-protsessa/ (дата обращения: 20.05.2025).

55. Игнашкин А.В. Инновационная технология трехмерной инспекции паяльной пасты PI [Электронный ресурс] // Pribor.ru. — URL: https://www.pribor.ru/articles/tekhnologicheskoe-oborudovanie/innovatsionnaya-tekhnologiya-trekhmernoy-inspektsii-payalnoy-pasty-pi/ (дата обращения: 20.05.2025).

56. Коршунов, Г.И. Обеспечение качества монтажа печатных плат на основе организации межмашинного взаимодействия и 3D-инспекций / Г.И. Коршунов, А.А. Петрушевская, П.С. Зайцев // Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая. - 2023. - № 7. - С. 35-41.

57. Зайцев П.С., Назаревич С.А. Внедрение технологических инноваций на производствах электроники на примере 3DSPI // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. - 2023. - С. 12. - Усл. печ. л. 15,04. - Тираж 150 экз.

58. Односторонние печатные платы [Электронный ресурс] // Rezonit: база знаний. — URL: https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tekhnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/odnostoronnie-pechatnye-platy/ (дата обращения: 20.05.2025).

59. Алюминиевые печатные платы [Электронный ресурс] // Rezonit: база знаний. — URL: https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tekhnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/alyuminievye-pechatnye-platy/ (дата обращения: 20.05.2025).

60. Двусторонние печатные платы [Электронный ресурс] // Rezonit: база знаний. — URL: https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tekhnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/dvustoronnie-pechatnye-plat/ (дата обращения: 20.05.2025).

61. СВЧ печатные платы [Электронный ресурс] // Rezonit: база знаний. — URL: https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tekhnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/svch-pechatnye-platy/ (дата обращения: 20.05.2025).

62. Многослойные печатные платы со сквозной металлизацией [Электронный ресурс] // Rezonit: база знаний. — URL: https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tekhnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/mnogosloynye-pechatnye-platy-skvoznaya-metallizatsiya/ (дата обращения: 20.05.2025).

63. Многослойные печатные платы: попарное прессование [Электронный ресурс] // Rezonit: база знаний. — URL: https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tekhnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/mnogosloynye-pechatnye-platy-poparnoe-pressovanie/ (дата обращения: 20.05.2025).

64. Гибкие печатные платы [Электронный ресурс] // Rezonit: база знаний. — URL: https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tekhnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/gibkie-pechatnye-platy/ (дата обращения: 20.05.2025).

65. Гибко-жесткие печатные платы [Электронный ресурс] // Rezonit: база знаний. — URL: https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tekhnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/gibko-zhestkie-pechatnye-platy/ (дата обращения: 20.05.2025).

66. Тентирование переходных отверстий [Электронный ресурс] // Rezonit: база знаний. — URL: https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tekhnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/tentirovanie-perekhodnykh-otverstiy/ (дата обращения: 20.05.2025).

67. Шваб К. Четвертая промышленная революция. — М.: Бомбора, 2016. — 230 с.

68. Тарасов И.В. Индустрия 4.0: понятие, концепции, тенденции развития [Текст] // Реальная экономика. — 2018. — № 6. — С. 57-63.

69. Липкин Е. Индустрия 4.0: Умные технологии – ключевой элемент в промышленной конкуренции. — М.: ООО «Остек-СМТ», 2017. — 224 с. — ISBN 978-5-9907248-2-2.

70. Индустрия 4.0 диктует новые подходы к автоматизации производства [Электронный ресурс] // Cosmetic-Industry. — URL: https://cosmetic-industry.com/industriya-4-0-diktuet-novyepodhody-k-avtomatizatsii-proizvodstva.html (дата обращения: 21.05.2025).

71. Тарасов И.В. Технологии индустрии 4.0: влияние на повышение производительности промышленных компаний [Текст] // Стратегические решения и риск-менеджмент. — 2018. — С. 62–69.

72. Пуха Ю. Индустриальная революция 4.0 [Текст] / PwC. — 2017. — 18 с.

73. Заполнение переходных отверстий эпоксидным компаундом с последующей металлизацией [Электронный ресурс] // Rezonit: база знаний. — URL: https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tekhnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/zapolnenie-perekhodnykh-otverstiy-epoksidnym-kompaundom-s-posleduyushchey-metallizatsiey-/ (дата обращения: 20.05.2025).

74. Зайцев П.С. Повышение качества продукции путём цифровизации процессов производства электроники // Труды V Международного форума «Метрологическое обеспечение инновационных технологий». - 2023. - С. 223.

75. Сольницев Р.И. Вопросы построения замкнутой системы управления «Природа-Техногеника» // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2009. - № 7. - С. 23-32.

76. Сольницев, Р.И. Об инструментарии проектирования и производства киберфизических систем / Р.И. Сольницев, Г.И. Коршунов // Наука и бизнес. — 2020. — № 6. — С. 102–107.

77. Сольницев, Р.И. Контроль качества кибер-физических 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.

78. Сольницев, Р.И. Контроль качества кибер-физических 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.

79. Сольницев Р.И. Лекции по информационным технологиям проектирования и производства киберфизических систем [Электронный ресурс]. — URL: https://etu.ru/dashboard/api/download/592579 (дата обращения: 20.05.2025).

80. Сольницев Р.И., Коршунов Г.И., Петрушевская А.А., Параничев А.В. Киберфизические системы в экологической безопасности и геомониторинге автотранспорта. - СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. - 147 с.

81. Lee E.A. Fundamental Limits of Cyber-Physical Systems Modeling [Текст] // ACM Transactions on Cyber-Physical Systems. — 2016. — Vol. 1, No. 1. — Art. 3.

82. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Основные дифференциальные уравнения математической физики. — М.: Физматгиз, 1962.

83. Большоков Н.А., Гуткин Л.С., Левин Б.Р., Стратонович Р.П. Математические основы современной электроники. — М.: Советское радио, 1968.

84. Чернецкий В.И. Об одном конечном представлении стационарных случайных функций в задачах теории автоматического управления / Под ред. Б.Н. Петрова. — М.: Наука, 1967.

85. Зайцев П.С., Фролова Е.А. Обеспечение качества предпроизводственных процессов при помощи CALS-систем в жизненном цикле радиоэлектронной продукции // Сборник докладов II Международной научно-практической конференции «Будущее знаний: вопросы развития науки, технологий и общества». - 2025. - С. 13-18.

86. Афанасьев В. Эволюция сборочно-монтажного производства. «Умная линия» [Текст] // Вектор высоких технологий. — 2017. — № 3(32).

87. IPC-SMEMA-9851: Mechanical Equipment Interface Standard [Текст]. — Bannockburn, IL: IPC, 2007.

88. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669584 Российская Федерация. Программа мониторинга радиопередающих устройств по протоколу LoRaWAN на базе микросхемы MIMX8MN5CVTIZAA для базовой станции ЛКЖС.464421.010 : № 2022668975 : заявл. 17.10.2022 : опубл. 21.10.2022 / К. А. Брусенцов, Г. И. Коршунов, И. Г. Коршунов [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственная фирма «ТОРЭКС». – EDN YCEDAS.

89. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680180 Российская Федерация. Программа модуля контроля работы ЛКЖС.421417.002 на базе микросхемы K1986BE92QI : № 2022668943 : заявл. 17.10.2022 : опубл. 28.10.2022 / Г. И. Коршунов, К. А. Брусенцов, П. С. Зайцев, А. Ю. Мячков ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ПАНТЕС». – EDN EEJOMK.

90. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680309 Российская Федерация. Программа модуля контроля работы

ЛКЖС.421417.001 на базе микросхемы ATtiny861A : № 2022668949 : заявл. 17.10.2022 : опубл. 31.10.2022 / Г. И. Коршунов, К. А. Брусенцов, П. С. Зайцев, А. Ю. Мячков ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ПАНТЕС». – EDN AYJOOI.

91. Вялый М., Подольский В., Рубцов А., Шварц Д., Шень А. Лекции по дискретной математике [Электронный ресурс] // publications.hse.ru. — URL: URL:https://publications.hse.ru/mirror/pubs/share/direct/393719078.pdf#page=202&zoom=100,118,437

92. Khuri A.I. Applications of Dirac's delta function in statistics [Текст] // International Journal of Mathematical Education in Science and Technology. — 2004. — Vol. 35, No. 2. — P. 185–195.

93. 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. 56-62.

94. 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.

95. Satoshi O., Watabe Y. Self-Programming Software Accelerates 3D Inspection and M2M Communication [Текст] // Manufacturing / Production Technology, Hardware & Services. — 2018.

96. Коршунов Г.И., Зайцев П.С. Математическая модель оценки вероятностей несоответствий в технологических процессах бездефектного наукоемкого производства электроники // Труды III Международного форума «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве». - 2023. - С. 191-193.

97. Коршунов Г.И. Статистический контроль качества электронных изделий в цифровых производственных линиях с оптическими инспекциями [Текст] // Контроль качества продукции. — 2024. — № 1. — С. 60–64.

98. Чичигина О.А., Петникова В.М. Предельный переход от распределения Пуассона к распределению Гаусса для физиков // Ученые записки физфака МГУ. — 2019. — № 6. — С. 1961001

99. Часть I и II. Типовые дефекты трафаретной печати [Электронный ресурс] // web.archive.org. — URL: https://web.archive.org/web/20080210145003/http://www.elinform.ru/articles_58.htm (дата обращения: 20.05.2025).

100. 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

101. ГОСТ Р 51901.12-2007 Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов. — Введ. 2008-07-01. — М.: Стандартинформ, 2008. — 34 с.

102. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 Менеджмент риска. Методы оценки риска. — Введ. 2012-07-01. — М.: Стандартинформ, 2012. — 44 с.

103. Korshunov G.I., Zaicev P.S., Petrushevskaya A.A. Methods and algorithms of technological preparation for organizing automatic surface mount of printed circuit boards // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - Vol. 1399. - Art. 033076. - P. 7.

104. А.В. Лопаткин Технологический редактор (CAM Editor) (Справочное руководство по командам и примеры работы в редакторе) [Электронный ресурс] // PCBSoft. — Год. — URL: https://www.pcbsoft.ru/_files/ugd/cc9e5f_42e9c698ba584c6f82d0517eb482da5c.pdf (дата обращения: 20.05.2025).

105. 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

106. Пайка волной припоя [Электронный ресурс] // Ostec-Smart: публикации. — URL: https://ostec-smart.ru/media/publications/smt/payka-volnoy-pripoya/ (дата обращения: 20.05.2025).

107. OpenPyXL Documentation [Электронный ресурс] // OpenPyXL Official Documentation. — URL: https://openpyxl.readthedocs.io/en/stable/tutorial.html (дата обращения: 20.05.2025).

108. Tkinter Documentation [Электронный ресурс] // Python Official Documentation. — URL: https://docs.python.org/3/library/tkinter.html (дата обращения: 20.05.2025).

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

110. Зайцев П.С., Коршунов Г.И. Алгоритм автоматического определения технологических параметров электронной компонентной базы // Труды III Международного форума «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве». - 2023. - С. 54-56.

111. 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.

112. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660490 Российская Федерация. Программа контроля и анализа электронной компонентной базы для подготовки производства монтажа электронных печатных плат : № 2021619885 : заявл. 28.06.2021 : опубл. 28.06.2021 / П. С. Зайцев, Г. И. Коршунов ; заявитель «ПАНТЕС груп». – EDN PTWWPP.

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

114. 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.

115. Selenium Python API Documentation [Электронный ресурс] // Selenium Official Documentation. — URL: https://www.selenium.dev/selenium/docs/api/py/index.html (дата обращения: 20.05.2025).

Приложение А. Код программы автоматического определения количественных технологических параметров монтажа.

```
import os
from tkinter import *
from openpyxl import load_workbook
from openpyxl.styles.borders import Border, Side
from selenium import webdriver
from bs4 import BeautifulSoup
from tkinter.ttk import Combobox


smddict = {}
thtdict = {}
bgadict = {}
lgadict = {}
qfndict = {}
rc0603dict = {}
mk0_5dict = {}
digiKeydictTHT = {}
digiKeydictSMD = {}

wb_smd = load_workbook('./SMD_Lib.xlsx')
sheet_smd = wb_smd['Лист1']

rowlib = 2
il1 = 2
namesmdlib = sheet_smd['A2']
while namesmdlib is not None:
    namesmdlib = sheet_smd.cell(row=il1, column=1).value
    il1 += 1
```

```
il1 -= 1
for row in range(2, il1):
    cell_value_class = sheet_smd.cell(row=rowlib, column=1).value
    cell_value_id = sheet_smd.cell(row=rowlib, column=2).value
    smddict[cell_value_class] = cell_value_id
    rowlib += 1

wb_tht = load_workbook('./THT_Lib.xlsx')
sheet_tht = wb_tht['Лист1']



rowlibt = 2
il2 = 2
namethtlib = sheet_tht['A2']
while namethtlib is not None:
    namethtlib = sheet_tht.cell(row=il2, column=1).value
    il2 += 1
il2 -= 1
for row in range(2, il2):
    cell_value_class = sheet_tht.cell(row=rowlibt, column=1).value
    cell_value_id = sheet_tht.cell(row=rowlibt, column=2).value
    thtdict[cell_value_class] = cell_value_id
    rowlibt += 1



wb_bga = load_workbook('./BGA_Lib.xlsx')
sheet_bga = wb_bga['Лист1']

rowlibB = 2
il3 = 2
```

```
namebgalib = sheet_bga['A2']
while namebgalib is not None:
    namebgalib = sheet_bga.cell(row=il3, column=1).value
    il3 += 1
il3 -= 1

for row in range(2, il3):
    cell_value_class = sheet_bga.cell(row=rowlibB, column=1).value
    cell_value_id = sheet_bga.cell(row=rowlibB, column=2).value
    bgadict[cell_value_class] = cell_value_id
    rowlibB += 1

wb_lga = load_workbook('./LGA_Lib.xlsx')
sheet_lga = wb_lga['Лист1']

rowlibL = 2
il4 = 2

namelgalib = sheet_lga['A2']
while namelgalib is not None:
    namelgalib = sheet_lga.cell(row=il4, column=1).value
    il4 += 1
il4 -= 1
for row in range(2, il4):
    cell_value_class = sheet_lga.cell(row=rowlibL, column=1).value
    cell_value_id = sheet_lga.cell(row=rowlibL, column=2).value
    lgadict[cell_value_class] = cell_value_id
    rowlibL += 1

wb_qfn = load_workbook('./QFN_Lib.xlsx')
```

```
sheet_qfn = wb_qfn['Лист1']

rowlibQ = 2
il5 = 2
nameqfnlib = sheet_qfn['A2']
while nameqfnlib is not None:
    nameqfnlib = sheet_qfn.cell(row=il5, column=1).value
    il5 += 1
il5 -= 1
for row in range(2, il5):
    cell_value_class = sheet_qfn.cell(row=rowlibQ, column=1).value
    cell_value_id = sheet_qfn.cell(row=rowlibQ, column=2).value
    qfndict[cell_value_class] = cell_value_id
    rowlibQ += 1

wb_RC0603 = load_workbook('./RC0603_Lib.xlsx')
sheet_RC0603 = wb_RC0603['Лист1']

rowlibRC = 2
il6 = 2
nameRC0603lib = sheet_RC0603['A2']
while nameRC0603lib is not None:
    nameRC0603lib = sheet_RC0603.cell(row=il6, column=1).value
    il6 += 1
il6 -= 1
for row in range(2, il6):
    cell_value_class = sheet_RC0603.cell(row=rowlibRC, column=1).value
    cell_value_id = sheet_RC0603.cell(row=rowlibRC, column=2).value
    rc0603dict[cell_value_class] = cell_value_id
    rowlibRC += 1
```

```
wb_mk0_5 = load_workbook('./NestForm_Lib.xlsx')
sheet_mk0_5 = wb_mk0_5['Лист1']

rowlibMK = 2
il7 = 2
namemk0_5lib = sheet_mk0_5['A2']
while namemk0_5lib is not None:
    namemk0_5lib = sheet_mk0_5.cell(row=il7, column=1).value
    il7 += 1
il7 -= 1
for row in range(2, il7):
    cell_value_class = sheet_mk0_5.cell(row=rowlibMK, column=1).value
    cell_value_id = sheet_mk0_5.cell(row=rowlibMK, column=2).value
    mk0_5dict[cell_value_class] = cell_value_id
    rowlibMK += 1

wb_digiKey_THT = load_workbook('./DigiKey_Lib_THT.xlsx')
sheet_digiKey_THT = wb_digiKey_THT['Лист1']

rowlib = 2
il8 = 2
nameDigiKey_Lib_THT = sheet_digiKey_THT['A2']
while nameDigiKey_Lib_THT is not None:
    nameDigiKey_Lib_THT = sheet_digiKey_THT.cell(row=il1, column=1).value
    il8 += 1
il8 -= 1
for row in range(2, il8):
    cell_value_class = sheet_digiKey_THT.cell(row=rowlib, column=1).value
    cell_value_id = sheet_digiKey_THT.cell(row=rowlib, column=2).value
```

```
    digiKeydictTHT[cell_value_class] = cell_value_id
    rowlib += 1

wb_digiKey_SMD = load_workbook('./DigiKey_Lib_SMD.xlsx')
sheet_digiKey_SMD = wb_digiKey_SMD['Лист1']

rowlib = 2
il9 = 2
nameDigiKey_Lib_SMD = sheet_digiKey_SMD['A2']
while nameDigiKey_Lib_SMD is not None:
    nameDigiKey_Lib_SMD = sheet_digiKey_SMD.cell(row=il1, column=1).value
    il9 += 1
il9 -= 1
for row in range(2, il8):
    cell_value_class = sheet_digiKey_SMD.cell(row=rowlib, column=1).value
    cell_value_id = sheet_digiKey_SMD.cell(row=rowlib, column=2).value
    digiKeydictSMD[cell_value_class] = cell_value_id
    rowlib += 1

pathDrivChrome = str(os.getcwd() + "\chromedriver")



def clicked1():

    pathfile = '{}'.format(pathFileEntry.get())
    os.chdir(str(pathfile))
    namefile = '{}'.format(nameFileEntry.get())
    wb = load_workbook(str(namefile))
    # Get a sheet by name
    sheet = wb['Лист1']
```

```
ws = wb.active
c = ws['B2']
ws.freeze_panes = c

row = 1
sheet['F' + str(row)] = 'THT'
sheet['G' + str(row)] = 'SMD'
sheet['M' + str(row)] = 'THT_dict'
sheet['N' + str(row)] = 'SMD_dict'
sheet['H' + str(row)] = 'BGA'
sheet['I' + str(row)] = 'LGA'
sheet['J' + str(row)] = 'QFN'
sheet['K' + str(row)] = 'Чипы <0603'
sheet.column_dimensions['K'].width = 13
sheet.column_dimensions['L'].width = 13
sheet['L' + str(row)] = 'Нест.Форм.'

thin_border = Border(left=Side(style='thin'),
                     right=Side(style='thin'),
                     top=Side(style='thin'),
                     bottom=Side(style='thin'))
bc = 16
while bc <= 23:
    sheet.cell(row=2, column=bc).border = thin_border
    sheet.cell(row=3, column=bc).border = thin_border
    sheet.cell(row=4, column=bc).border = thin_border
    sheet.cell(row=5, column=bc).border = thin_border
    sheet.cell(row=6, column=bc).border = thin_border
    sheet.cell(row=7, column=bc).border = thin_border
    sheet.cell(row=8, column=bc).border = thin_border
```

```
    sheet.cell(row=9, column=bc).border = thin_border
    bc += 1

sheet.merge_cells('P2:V2')
sheet.column_dimensions['P'].width = 30
sheet.column_dimensions['V'].width = 13
sheet['P2'] = 'Суммарные данные'
sheet['Q3'] = 'THT'
sheet['R3'] = 'SMD'
sheet['S3'] = 'BGA'
sheet['T3'] = 'LGA'
sheet['U3'] = 'QFN'
sheet['V3'] = 'Чипы <0603'
sheet['P4'] = 'Количество паек'
sheet['P5'] = 'Количество номиналов'
sheet['P6'] = 'Количество компонентов'
sheet['P7'] = 'Кол. компонентов Top'
sheet['P8'] = 'Кол. компонентов Bottom'
sheet['P9'] = 'Проверка по быстр. подсчету'

sheet['Q4'] = '=суммпроизв(F:F,C:C)'
sheet['R4'] = '=суммпроизв(G:G,C:C)'
sheet['S4'] = '=суммпроизв(H:H,C:C)'
sheet['T4'] = '=суммпроизв(I:I,C:C)'
sheet['U4'] = '=суммпроизв(J:J,C:C)'
sheet['V4'] = '=суммпроизв(K:K,C:C)'
sheet['Q5'] = '=COUNT(F:F)'
sheet['R5'] = '=COUNT(G:G)'
sheet['S5'] = '=COUNT(H:H)'
sheet['T5'] = '=COUNT(I:I)'
```

```
sheet['U5'] = '=COUNT(J:J)'
sheet['V5'] = '=COUNT(K:K)'
sheet['Q6'] = '=суммесли(F:F,">0",$C:$C)'
sheet['R6'] = '=суммесли(G:G,">0",$C:$C)'
sheet['S6'] = '=суммесли(H:H,">0",$C:$C)'
sheet['T6'] = '=суммесли(I:I,">0",$C:$C)'
sheet['U6'] = '=суммесли(J:J,">0",$C:$C)'
sheet['V6'] = '=суммесли(K:K,">0",$C:$C)'
i = 2

namecomp = sheet['A2']
while namecomp is not None:
    namecomp = sheet.cell(row=i, column=1).value
    if namecomp is not None:
        for key in thtdict:
            if key in namecomp:
                sheet['F' + str(i)] = (thtdict[key])
                sheet['M' + str(i)] = key
        for key in smddict:
            if key in namecomp:
                sheet['G' + str(i)] = (smddict[key])
                sheet['N' + str(i)] = key
    i += 1

namecomp = sheet['A2']
i = 2

while namecomp is not None:
    namecomp = sheet.cell(row=i, column=1).value
    tht = sheet.cell(row=i, column=6).value
```

```
    smd = sheet.cell(row=i, column=7).value
    if (namecomp is not None) and (smd is None) and (tht is None):
        namecomp = namecomp.replace(' ', '')
        for key in thtdict:
            if key in namecomp:
                sheet['F' + str(i)] = (thtdict[key])
                sheet['M' + str(i)] = key
        for key in smddict:
            if key in namecomp:
                sheet['G' + str(i)] = (smddict[key])
                sheet['N' + str(i)] = key
    i += 1

i = 2
namecomp = sheet['A2']
while namecomp is not None:
    namecomp = sheet.cell(row=i, column=1).value
    if namecomp is not None:
        for key in bgadict:
            if key in namecomp:
                sheet['H' + str(i)] = (bgadict[key])
    i += 1
i = 2

namecomp = sheet['A2']
while namecomp is not None:
    namecomp = sheet.cell(row=i, column=1).value
    if namecomp is not None:
        namecomp = namecomp.replace(' ', '')
        for key in bgadict:
```

```
            if key in namecomp:
                sheet['H' + str(i)] = (bgadict[key])
    i += 1

i = 2
namecomp = sheet['A2']
while namecomp is not None:
    namecomp = sheet.cell(row=i, column=1).value
    if namecomp is not None:
        for key in lgadict:
            if key in namecomp:
                sheet['I' + str(i)] = (lgadict[key])
    i += 1
i = 2

namecomp = sheet['A2']
while namecomp is not None:
    namecomp = sheet.cell(row=i, column=1).value
    if namecomp is not None:
        namecomp = namecomp.replace(' ', '')
        for key in lgadict:
            if key in namecomp:
                sheet['I' + str(i)] = (lgadict[key])
    i += 1

i = 2
namecomp = sheet['A2']
while namecomp is not None:
    namecomp = sheet.cell(row=i, column=1).value
    if namecomp is not None:
```

```
        for key in qfndict:
            if key in namecomp:
                sheet['J' + str(i)] = (qfndict[key])
        i += 1
i = 2
namecomp = sheet['A2']
while namecomp is not None:
    namecomp = sheet.cell(row=i, column=1).value
    if namecomp is not None:
        namecomp = namecomp.replace(' ', '')
        for key in qfndict:
            if key in namecomp:
                sheet['J' + str(i)] = (qfndict[key])
    i += 1


i = 2
namecomp = sheet['A2']
while namecomp is not None:
    namecomp = sheet.cell(row=i, column=1).value
    if namecomp is not None:
        for key in rc0603dict:
            if key in namecomp:
                sheet['K' + str(i)] = (rc0603dict[key])
        i += 1
i = 2
namecomp = sheet['A2']
while namecomp is not None:
    namecomp = sheet.cell(row=i, column=1).value
    if namecomp is not None:
        namecomp = namecomp.replace(' ', '')
```

```
        for key in rc0603dict:
            if key in namecomp:
                sheet['K' + str(i)] = (rc0603dict[key])
    i += 1


i = 2
namecomp = sheet['A2']
while namecomp is not None:
    namecomp = sheet.cell(row=i, column=1).value
    if namecomp is not None:
        for key in mk0_5dict:
            if key in namecomp:
                sheet['L' + str(i)] = (mk0_5dict[key])
        i += 1
i = 2
namecomp = sheet['A2']
while namecomp is not None:
    namecomp = sheet.cell(row=i, column=1).value
    if namecomp is not None:
        namecomp = namecomp.replace(' ', '')
        for key in mk0_5dict:
            if key in namecomp:
                sheet['L' + str(i)] = (mk0_5dict[key])
    i += 1
parsValui = combo.get()
if parsValui == 'Да':
    driver = webdriver.Chrome(pathDrivChrome)
    i = 2
    namecomp = sheet['A2']
```

```
    while namecomp is not None :
        namecomp = sheet.cell(row=i, column=1).value
        THT_val = sheet.cell(row=i, column=6).value
        SMD_val = sheet.cell(row=i, column=7).value
        if namecomp is not None and THT_val is None and SMD_val is None:
            driver.get('https://www.digikey.com/')
            # Ввести наименование в поиске диджикей
            name_elem = driver.find_element_by_class_name("search-textbox")
            name_elem.click()
            name_elem.send_keys(namecomp)
            btn_elem = driver.find_element_by_class_name("search-button")
            btn_elem.click()
            requiredHtml = driver.page_source
            soup = BeautifulSoup(requiredHtml, 'html5lib')
            table = soup.find_all("td", class_="MuiTableCell-root")
            stroka = str('Package / Case')
            pars_i = 0
            while pars_i < len(table):
                if stroka == table[pars_i].text:
                    pars_g = pars_i + 1
                    sheet['E' + str(i)] = table[pars_g].text
                    break
                else:
                    pars_i += 1
        i += 1
filename = 'Пайки' + '.xlsx'
wb.save(filename)

os.chdir(pathfile)
os.system('start excel.exe "%s\\%s"' % (pathfile, filename,))
```

```
window = Tk()
window.title("Подсчет паек по СП")
lbl = Label(window, text="Введите путь к файлу")
lbl.grid(column=0, row=0)
lbl = Label(window, text="Введите имя файла")
lbl.grid(column=0, row=1)
lbl = Label(window, text="Версия программы ZPS-9", font=("Arial Bold", 7))
lbl.grid(column=1, row=4)
lbl = Label(window, text="Наименование компонента - столбец 'A'", font=("Arial
Bold", 10))
lbl.grid(column=1, row=5)
lbl = Label(window, text="Вывод паек THT и SMD - столбец 'F' и 'G'", font=("Arial
Bold", 10))
lbl.grid(column=1, row=6)
lbl = Label(window, text="Поиск по Digikey", font=("Arial Bold", 10))
lbl.grid(column=0, row=2)
btn = Button(window, text="Ок", command=clicked1)
btn.grid(column=1, row=3)
window.geometry('435x250')
pathFileEntry = Entry(window, width=50)
pathFileEntry.grid(column=1, row=0)
nameFileEntry = Entry(window, width=50)
nameFileEntry.grid(column=1, row=1)
combo = Combobox(window)
combo['values'] = ("Нет", "Да")
combo.current(0)
combo.grid(column=1, row=2)
window.mainloop()
```

Приложение Б. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «НПФ «Торэкс»

ООО «НПФ «ТОРЭКС» ИНН 7825442718 КПП 780601001
Юридический адрес:195248, Санкт-Петербург, Ириновский пр., д. 2, ЛИТ. А, ПОМ. 10Н ОФИС 310
Почтовый адрес:195248, Санкт-Петербург, а/я 65
КОНТРАКТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОНИКИ

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «НПФ «ТОРЭКС»
_____А.П. Кулев
«10» октября 2024г.

АКТ
о внедрении научных результатов диссертационной работы Зайцева Петра Сергеевича

Комиссия в составе:
Председатель: Кулев Андрей Петрович, Генеральный директор.

Члены комиссии:
1. Брусенцов Кирилл Аркадьевич, к.т.н., заместитель генерального директора
2. Чуписов Антон Евгеньевич, начальник отдела технической поддержки

подтверждает, что в рамках системы менеджмента качества ООО «НПФ «ТОРЭКС» внедрены следующие научные результаты диссертационной работы Зайцева П.С. «Модели и методики обеспечения качества предпроизводственных этапов жизненного цикла радиоэлектронной 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;
— 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.

Внедрение представленных результатов позволило:

1. снизить вероятность появления несоответствий на этапе комплектования изделия на 3-7%.
2. сократить время анализа количественных показателей РЭП на 85-94% и снизить количество несоответствий на 12% при условии наличия в БД компонентов из состава РЭП.

Председатель:
Кулев Андрей Петрович _____

Члены комиссии
Брусенцов Кирилл Аркадьевич _____
Чуписов Антон Евгеньевич _____

Приложение В. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ФГАОУ ВО ГУАП

ГУАП

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

(ГУАП)

Санкт-Петербург

УТВЕРЖДАЮ
Ректор,
доктор экономических наук,
профессор
_____ Ю.А. Антохина
МП
«17» 02 2025г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ
результатов диссертационной работы
Зайцева Петра Сергеевича
«Модели и методики обеспечения качества предпроизводственных этапов жизненного цикла радиоэлектронной продукции», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

Комиссия в составе:

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

Члены комиссии:

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

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

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

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Модели и методики обеспечения качества предпроизводственных этапов жизненного цикла радиоэлектронной продукции», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук:

— 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;

— 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;

— 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;

— 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;

— 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;

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

Материалы диссертационной работы Зайцева Петра Сергеевича были использованы в учебном процессе в дисциплинах «Автоматизированные производственные системы», «Организация проектно-конструкторской деятельности», «Технология цифровых процессов в управлении организацией», «Компонентное обеспечение на этапах жизненного цикла продукции», «Проектно-ориентированные методы разработки продукции», читаемых на кафедре №5 Инноватики и интегрированных систем качества для студентов направлений «Управление качеством», «Инноватика», «Стандартизация и метрология» уровня бакалавриата и магистратуры.

Председатель комиссии
зам. директора института ФПТИ,
канд. техн. наук, доцент — А.В. Чабаненко

Члены комиссии:

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

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

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

Приложение Г. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ООО «ПАНТЕС»

ПАНТЕС
Производство электроники

Юридический адрес: 197350, г. Санкт-Петербург, вн.тер.г. муниципальный округ Коломяги, дор. в Каменку, д. 74, литера А, ком. 197
Почтовый адрес для финансовых документов: 195248, Санкт-Петербург, а/я 57

ООО «ПАНТЕС» ИНН 7839043576 КПП 781401001

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «ПАНТЕС»
_____ И.Г. Коршунов
«13» февраля 2025г.

АКТ
о внедрении научных результатов диссертационной работы
Зайцева Петра Сергеевича
«Модели и методики обеспечения качества предпроизводственных этапов жизненного цикла радиоэлектронной продукции»

Комиссия в составе:
Председатель: Коршунов Игорь Геннадьевич, к.т.н., Генеральный директор.

Члены комиссии:
1. Менеджер по управлению качеством Григоренко Юлия Владимировна
2. Заместитель начальника производства по качеству Толстихина Инна Львовна

составили настоящий акт о том, что научные результаты диссертационной работы Зайцева П.С. «Модели и методики обеспечения качества предпроизводственных этапов жизненного цикла радиоэлектронной продукции»:

— 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;

— методика автоматизации процессов предпроизводственной подготовки радиоэлектронной продукции, реализующая алгоритмизацию трудноформализуемых операций конструкторско-технологической подготовки в CAM-системах;

внедрены на рабочие места инженерного отдела и применены для повышения качества процессов подготовки производства радиоэлектронной продукции.

Комиссия установила: внедрение указанных результатов позволяет сократить вероятность появления несоответствий при выполнении автоматического монтажа на 7-10%, сократить время проведения определенных операций предпроизводственной подготовки на 37% и снизить уровень несоответствий при проведении анализа топологии печатной платы из состава РЭП на 10%.

Председатель:
Коршунов Игорь Геннадьевич _____

Члены комиссии
Григоренко Юлия Владимировна
Толстихина Инна Львовна _____

Приложение Д. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в АО «НИИ «Масштаб»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора
АО «НИИ «Масштаб» по научной работе
Кандидат технических наук
А.Г. Фортинский
«23» мая 2025 года

АКТ

внедрения в АО «НИИ «Масштаб» научных результатов диссертационной работы Зайцева Петра Сергеевича:

— Методика автоматизации процессов предпроизводственной подготовки радиоэлектронной продукции, реализующая алгоритмизацию трудноформализуемых операций конструкторско-технологической подготовки в CAM-системах;
— 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.

Комиссия в составе: председателя комиссии, советника генерального директора, доктора технических наук, кандидата военных наук, доцента Билятдинова К.З. и членов комиссии: начальника научно-системного центра Гагарина С.П. и начальника научно-технического отдела Хрусталевой Е.В. в период с 19.04.2025 по 16.05.2025 провела проверку реализации научных результатов диссертационной работы Зайцева П.С. и установила, что внедрение указанных результатов позволяет:

1. Сократить время проведения определенных операций предпроизводственной подготовки на 37% и снизить уровень несоответствий при проведении анализа топологии печатной платы из состава РЭП на 10%.
2. Сократить время анализа количественных показателей РЭП на 85-94% и снизить количество несоответствий на 12%.

Результат достигается за счет цифровизации процессов и автоматизации анализа топологии печатной платы из состава РЭП, а также сбора и обработки технических характеристик компонентов.

Научные результаты диссертационной работы внедрены в процессы подготовки производства РЭП для трудноформализуемых операций конструкторско-технологической подготовки и процесса анализа монтажа печатных плат.

Председатель комиссии:
Советник генерального директора АО «НИИ «Масштаб»
Доктор технических наук, кандидат военных наук, доцент К.З. Билятдинов
Члены комиссии:
Начальник научно-системного центра С.П. Гагарин
Начальник научно-технического отдела Е.В. Хрусталева
«23» мая 2025 года

ВЕРНО (Одобрено решением НТС. Протокол НТС № 14 от 23.05.2025):
Секретарь НТС АО «НИИ «Масштаб»
Начальник научно-технического отдела Е.В. Хрусталёва
«23» мая 2025 года

Приложение В. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021660490

Программа контроля и анализа электронной компонентной базы для подготовки производства монтажа электронных печатных плат

Правообладатель: *"ПАНТЕС груп" (RU)*

Авторы: *Зайцев Петр Сергеевич (RU), Коршунов Геннадий Иванович (RU)*

Заявка № 2021619885

Дата поступления 28 июня 2021 г.

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ *28 июня 2021 г.*

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Владелец Ивлиев Григорий Петрович

Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022669584

Программа мониторинга радиопередающих устройств по протоколу LoRaWAN на базе микросхемы MIMX8MN5CVTIZAA для базовой станции ЛКЖС.464421.010

Правообладатель: ***Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственная фирма «ТОРЭКС» (RU)***

Авторы: ***Брусенцов Кирилл Аркадьевич (RU), Коршунов Геннадий Иванович (RU), Коршунов Игорь Геннадьевич (RU), Чуписов Антон Евгеньевич (RU), Зайцев Петр Сергеевич (RU)***

Заявка № **2022668975**

Дата поступления **17 октября 2022 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ ***21 октября 2022 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 68b80077e14e910a94edbd24145d5c7
Владелец Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 26.12.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022680180

Программа модуля контроля работы ЛКЖС.421417.002 на базе микросхемы К1986ВЕ92QI

Правообладатель: ***Общество с ограниченной ответственностью «ПАНТЕС» (RU)***

Авторы: ***Коршунов Геннадий Иванович (RU), Брусенцов Кирилл Аркадьевич (RU), Зайцев Петр Сергеевич (RU), Мячков Андрей Юрьевич (RU)***

Заявка № **2022668943**

Дата поступления **17 октября 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ ***28 октября 2022 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат 68b90077[illegible]4e[illegible]10294edbd24145d5c7

Владелец Зубов Юрий Сергеевич

Действителен с [illegible]22 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022680309

Программа модуля контроля работы ЛКЖС.421417.001 на базе микросхемы ATtiny861A

Правообладатель: ***Общество с ограниченной ответственностью «ПАНТЕС» (RU)***

Авторы: ***Коршунов Геннадий Иванович (RU), Брусенцов Кирилл Аркадьевич (RU), Зайцев Петр Сергеевич (RU), Мячков Андрей Юрьевич (RU)***

Заявка № **2022668949**

Дата поступления **17 октября 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ ***31 октября 2022 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e[illegible]0010b94edbd24145d5c7
Владелец Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с [illegible]2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов