

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

Диссертационный совет: 24.2.327.12

Соискатель: Коробков Максим Андреевич

Тема диссертации: «Разработка метода оценки выхода годных печатных плат по их конструктивно-технологическим параметрам»

Специальность: 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (технические науки)

Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:

На очном заседании 25 ноября 2025 г., протокол № 6, диссертационный совет пришёл к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствующую критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, установленным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 с изменениями и дополнениями от 30 июля 2014 г., 21 апреля, 2 августа 2016 г., 29 мая, 28 августа 2017 г., 1 октября 2018 г., 20 марта, 11 сентября 2021 г., 26 сентября 2022 г., 26 января, 18 марта, 26 октября 2023 г., 25 января, 16 октября 2024 г., и принял решение присудить Коробкову Максиму Андреевичу учёную степень кандидата технических наук.

Присутствовали: председатель диссертационного совета д.т.н., профессор Бусурин Владимир Игоревич, учёный секретарь диссертационного совета к.т.н., доцент Васильев Федор Владимирович, члены диссертационного совета:

2.2.9., д.т.н., проф. Кондратенко Владимир Степанович,

2.2.9., д.т.н., доц. Андрианова Наталья Николаевна,

2.2.11., д.т.н. Баранов Александр Михайлович,

2.2.9., д.ф.-м.н., проф. Борисов Анатолий Михайлович,

2.2.9., д.т.н., проф. Кузнецов Павел Михайлович,

2.2.11., д.т.н., проф. Кириллов Владимир Юрьевич,

2.2.11., д.т.н., доц. Микаева Светлана Анатольевна,

2.2.9., д.т.н., проф. Назаров Александр Викторович,

2.2.11., д.т.н., с.н.с. Пенкин Владимир Тимофеевич,

2.2.11., д.т.н., доц. Протасов Владислав Иванович,

2.2.9., д.т.н., проф. Суминов Игорь Вячеславович.

Проректор по научной работе
д.т.н., доцент



Председатель диссертационного
совета 24.2.327.12, д.т.н., профессор

Учёный секретарь диссертационного
совета 24.2.327.12, к.т.н., доцент

А.В. Иванов

В.И. Бусурин

Ф.В. Васильев

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.327.12,
созданного на базе федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
по диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук
Аттестационное дело № _____
Решение диссертационного совета от 25 ноября 2025 г. № 6

О присуждении **Коробкову Максиму Андреевичу**, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка метода оценки выхода годных печатных плат по их конструктивно-технологическим параметрам» по специальности 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (технические науки) принята к защите 09 сентября 2025 г. (протокол № 4) диссертационным советом 24.2.327.12, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России), 125993, г. Москва, ГСП-3, А-80, Волоколамское шоссе, д.4., утверждённым приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №1315/нк от 22.06.2023.

Соискатель Коробков Максим Андреевич 17 мая 1998 г. рождения.

В 2021 г. окончил с отличием федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки магистров 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника». Диплом об окончании магистратуры выдан 23 июня 2021 года, серия 107718 1243357, рег. № 2021/3О-0722Д.

В 2025 г. окончил аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)» по направлению подготовки 12.06.01 «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии». Диплом об окончании аспирантуры выдан 07 июля 2025 года, серия 107718 1413846, рег. 2025/3О-0778Д.

Работает в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре 307 «Цифровые технологии и информационные системы» в должности старшего преподавателя и младшим научным сотрудником в научно-исследовательском отделе НИО-307.

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре 307 «Цифровые технологии и информационные системы».

Научный руководитель — Васильев Федор Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой 307 «Цифровые технологии и информационные системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Официальные оппоненты:

Мешков Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологии приборостроения» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,

Разживалов Павел Николаевич, кандидат технических наук, заместитель директора по образовательной деятельности института нано- и микросистемной техники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация — федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук (НТЦ УП РАН), в своём положительном отзыве, рассмотренном в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научно-технологическом центре уникального приборостроения Российской академии наук, протокол № 77 от 20.10.2025 г., подписанном заведующим отделом акустооптических информационных систем (НИО-2) НТЦ УП РАН, доктором физико-математических наук, Пожаром Витольдом Эдуардовичем, указала, что научная новизна и положения, выносимые на защиту в работе Коробкова М.А., доказаны и обоснованы.

Работа соответствует паспорту специальности 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (технические науки) по пунктам 1, 2 и 8.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации и полно отражает основные положения и выводы диссертационной работы.

Диссертационная работа представляет собой законченную научно-техническую квалификационную работу. Научная новизна и положения, выносимые на защиту, доказаны и обоснованы.

Диссертационная работа соответствует требованиям, указанным в «Положении о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, а её автор, Коробков Максим Андреевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (технические науки).

Комплексный характер разработок обеспечивает возможность их внедрения в производственные цепочки для снижения трудоемкости и повышения экономической эффективности. Внедрение результатов диссертации целесообразно в организациях, специализирующихся в области проектирования и изготовления электронной продукции, в частности ООО «Резонит», ОАО «Раменский приборостроительный завод», АО «НПП «Пульсар», ООО «НПП «ИТЭЛМА», АО НИИТП, а также в области создания систем автоматизированного проектирования печатных узлов, например, АО «Эремекс», ООО «Литиум». К диссертации приложены акты о внедрении ее результатов в рабочий процесс АО «НИЦЭВТ», АО «АВЭКС» и в учебный процесс МАИ.

Соискатель имеет 30 научных публикаций по теме диссертации, в том числе 4 работы, опубликованные в журналах, включенных в Перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, 4 — в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных.

Опубликованные результаты получены либо лично соискателем, либо при его непосредственном участии. Материалы диссертации отображены в трудах 15 международных научно-технических конференций. Соискатель является автором трех свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ, одного патента на изобретение.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Коробков М.А., Барабанов В.С. Вероятностный подход к оценке качества проведения операции фотолитографии при производстве печатных плат // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника — 2025. — №28(1). — 17–34.

В статье приводится описание процесса экспериментального исследования адекватности модели оценки вероятности выхода годной заготовки на операции фотолитографии на лабораторной производственной линии печатных плат.

Личный вклад Коробкова М.А. заключается в разработке и проверке адекватности модели оценки вероятности выхода годной заготовки на операции фотолитографии, разработке и апробации методики экспериментального определения параметров операции фотолитографии.

2. Коробков М.А. Применение установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы для компенсации деформации печатных плат Известия высших учебных заведений. Приборостроение — 2024. — Т.67, — № 7 — С. 622–632.

В статье приводится описание процесса разработки алгоритма совмещения шаблона и заготовки на основе конечно-элементной сетки при использовании установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы для апробации модели оценки выхода годных заготовок на операции совмещения, а также приведены результаты экспериментального исследования разработанного алгоритма.

3. Korobkov M.A., Vasilyev F.V., Khomutskaya O.V. Analytical Model for Evaluating the Reliability of Vias and Plated Through-Hole Pads on PCBs // *Inventions* — 2023. — Vol. 8. — Issue 3, 77. — 21 p.

В статье приводится описание процесса разработки математической модели выхода годной контактной площадки в процессе сверления, определение параметров стандартов приемки для формирования модели, исследование влияния конструктивно-технологических параметров на вероятность выхода годных и формирование методики определения параметров каплевидной контактной площадки.

Личный вклад Коробкова М.А. заключается в разработке и исследовании математических моделей оценки вероятности выхода годной заготовки для технологических операций фотолитографии и травления.

4. Korobkov M.A., Vasilyev F.V., Mozharov V.A. A Comparative Analysis of Printed Circuit Boards with Surface-Mounted and Embedded Components under Natural and Forced Convection // *Micromachines* — 2022. — Vol. 14, — Issue 4, 634.

В статье приводится анализ физико-химического способа оценки надежности печатных плат применительно к процессам распределения тепла по печатным платам в условиях естественной и вынужденной конвекции при изменении способа монтажа компонентов: поверхностного и встроенного.

Личный вклад Коробкова М.А. заключается в исследовании способов оценки качества печатных узлов на основе методов физической надежности электроники, построении имитационной модели оценки надежности печатных узлов в зависимости от их конструкции и условий применения.

5. Vasilyev, F.V., Isaev, V.V., Korobkov, M.A. The influence of the PCB design and the process of their manufacturing on the possibility of a defect-free production // *Przeglad Elektrotechniczny* — 2021. — Vol. 97, — № 3 — Pp. 91–96.

В статье приводится описание процесса разработки модели оценки вероятности выхода годной заготовки на операциях фотолитографии и травления, а также с помощью методов имитационного моделирования производится исследование влияния технологических параметров разных производственных линий на вероятность выхода годных.

Личный вклад Коробкова М.А. заключается в разработке и исследовании математических моделей оценки вероятности выхода годной заготовки для технологических операций сверления; разработке и исследовании методики определения параметров каплевидных контактных площадок для сквозных металлизированных отверстий печатных плат.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных автором работах.

На диссертационную работу поступили следующие отзывы (все положительные):

Отзыв на диссертацию ведущей организации — федерального государственного бюджетного учреждения науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук.

Отзыв утверждён и.о. директора, доктором технических наук, доцентом Афанасьевым Михаилом Сергеевичем.

По диссертационной работе Коробкова Максима Андреевича имеются следующие замечания:

1. В тексте диссертации часто встречается формулировка «модель оценки», которая на наш взгляд неудачна; правильнее было бы использовать формулировки, например, «метод оценки», «выражение для оценки», «формула для вычисления вероятности...», «модель ... процесса, позволяющая вычислить вероятность» и т.п.

2. В работе не рассмотрено влияние операции прессования на вероятность выхода годных печатных плат, хотя согласно разделу 1.5 она вносит существенный вклад.

3. В разработанной методике экспериментального определения технологических параметров операции фотолитографии не определены требования к оптической системе для оцифровки тест-купонов в зависимости от классов точности изготавливаемых печатных плат.

4. В разработанном прототипе установки прямого экспонирования система обратной связи положения заготовки на рабочем поле не учитывает дисторсию оптической системы.

5. При реализации алгоритма совмещения шаблона и заготовки для определения координат реперных знаков необоснованно использовано преобразование Хафа без сравнительного анализа других алгоритмов распознавания на основе определения центра масс объекта или нейросетей.

При этом отмечено, что, несмотря на указанные замечания, диссертационная работа представляет собой завершённое научное исследование, в полной мере решающее все поставленные автором задачи, и заслуживает положительной оценки.

Диссертационная работа содержит новые результаты, имеющие научное значение и важную практическую значимость. Результаты, полученные автором, являются актуальными для повышения качества проектирования и производства печатных плат.

Диссертационная работа Коробкова Максима Андреевича соответствует требованиям, изложенным в постановлении «О присуждении учёных степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (технические науки).

Отзыв на диссертацию официального оппонента

Мешкова Сергея Анатольевича, доктора технических наук, профессора кафедры «Технологии приборостроения» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный

исследовательский университет)». Сведения о Мешкове С.А. подтверждены специалистом по персоналу Поваляевой Н.О.

В замечаниях по диссертационной работе указано:

1. При анализе методов оценки качества печатных плат автор рассматривает основные методы оценки показателей надежности: вероятностно-статистический и физико-химический. Однако исследования, проведенные в настоящей работе, не относятся к надежности, показателей надежности автор не определяет. Представляется, что предметная область исследований лежит в сфере обеспечения технологичности печатных плат.

2. Для вероятностного описания процесса фотолитографии автор использует параметр неровности края проводника. Причина такого выбора не очевидна. В подобных случаях принято рассматривать вариации ширины самого проводника.

3. При построении математических моделей оценки вероятности выхода годной заготовки на критически значимых операциях автор основывается на предположении, что технологические погрешности (неровность края проводника, смещение центра отверстия относительно контактной площадки по одной из координатных осей) подчинены закону распределения Гаусса, что справедливо исходя из общетеоретических представлений, но требует подтверждения в условиях конкретного производства.

4. Математическая модель выхода годной контактной площадки не учитывает влияние вариации диаметра сверла, а также изменение величины погрешностей по координатному полю станка, что снижает точность полученных оценок вероятности выхода годных плат.

5. Экспериментальные исследования проведены не на производственной, а на лабораторной линии изготовления печатных плат с достаточно большими погрешностями параметров технологических операций, что и объясняет высокую эффективность предложенных авторов методик и алгоритмов на приведенных примерах. Представляется целесообразным продемонстрировать эффективность разработанных методик в условиях серийного производства.

При этом отмечено, что указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на положительную оценку диссертационной работы Коробкова М.А. в целом.

Диссертационная работа Коробкова Максима Андреевича «Разработка метода оценки выхода годных печатных плат по их конструктивно-технологическим параметрам» является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей новое решение актуальной задачи повышения качества проектирования и производства печатных плат и включающей новые результаты, имеющие научную ценность и практическое значение.

Диссертационная работа соответствует требованиям, изложенным в Положении о присуждении учёных степеней, а ее автор — Коробков Максим Андреевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (технические науки).

Отзыв на диссертацию официального оппонента

Разживалова Павла Николаевича, кандидата технических наук, заместителя директора института нано- и микросистемной техники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники». Подпись Разживалова П.Н. удостоверена учёным секретарём Учёного совета Козловым А.В.

В замечаниях по диссертационной работе указано:

1. Перечень причин возникновения дефектов на печатных платах является более широким, чем рассмотрено в исследовании. Помимо параметров конструкции и характеристик технологического процесса также оказывают значительное влияние: человеческий фактор, режимы работы оборудования, дефекты исходного сырья и параметры производственной среды, что влечет за собой наличие иных неучтенных переменных в разработанных математических моделях. В этой связи представляется необходимым либо формализовать определения, указав, что предложенная модель параметра выхода годной продукции является корректной при выполнении определенного перечня допущений, либо расширить набор влияющих факторов.

2. В тексте работы не обоснован выбор технологических параметров, соответствующих лабораторным и производственным условиям при анализе вероятности получения проводящего рисунка без дефектов в зависимости от проектируемой ширины проводника (п. 2.2.3, Рисунок 31).

3. В работе сделан вывод о том, что применение каплевидной контактной площадки повышает вероятность выхода годной продукции (п. 3.4). Вместе с тем, в исследовании, отсутствует оценка вероятности дефекта для случая, когда на разных слоях печатной платы каплевидные контактные площадки расположены неконцентрично или проводники подходят к ним с различных сторон. Несмотря на то, что каплевидная форма увеличивает область контактной площадки, доступную для формирования отверстия, при несовпадении этих областей на разных слоях положительный эффект может быть ниже расчетного. Его величину в такой конфигурации необходимо оценивать отдельно для каждого случая размещения, что, в свою очередь, может потребовать введения дополнительных ограничений для обеспечения идентичного расположения контактных площадок на всех слоях.

4. В автореферате заявлено, что разработанный автором прототип установки прямого экспонирования обеспечивает изготовления печатных плат 4 класса точности по ГОСТ Р 53429-2009, однако конкретная достигнутая точность воспроизведения топологии не оговорена и нуждается в уточнении ее количественных характеристик.

5. Приведенные в п. 5.5 рекомендации по практическому применению составляющих метода оценки выхода годных печатных плат слабо отражены в автореферате и ограничиваются частными результатами использования отдельных составляющих метода.

При этом отмечено, что указанные замечания не снижают ценность и качество научно-исследовательской работы и не являются определяющими.

Рассмотренная диссертационная работа соответствует специальности научных работников 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры в отношении: научного обоснования новых методов проектирования элементов радиоэлектронной аппаратуры на базе решения проблем обеспечения надежности их работы (пункт 1); совершенствования существующих математических моделей приборов и технологических процессов их изготовления с учётом решения вопросов обеспечения их эффективного применения, надежности, способных стать базой алгоритмического и программно-технического обеспечения проектирования, возможности его автоматизации и внедрения в цифровые информационные технологии (пункт 2); разработки и исследования элементов систем качества приборостроительного производства, элементов систем качества, моделей и методик обеспечения управления качеством с учётом решения вопросов обеспечения их эффективного применения, надежности, возможности внедрения в цифровые информационные технологии (пункт 8).

Диссертационная работа «Разработка метода оценки выхода годных печатных плат по их конструктивно-технологическим параметрам» соответствует всем требованиям, изложенным в постановлении ВАК «О присуждении учёных степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Коробков Максим Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры.

На автореферат поступило 6 (шесть) отзывов. Все отзывы положительные. Отзывы содержат следующие замечания:

1. Отзыв на автореферат диссертации от ООО «НПП ИТЭЛМА», составленный ведущим инженером-конструктором отдела разработки электроники группы трассировки печатных плат Дементьевым А.С. (подпись заверена ведущим специалистом по кадрам Симакиной Н.А.), содержит следующие замечания:

1. В работе декларируется, что в ходе исследования определены технологические операции, оказывающие наибольшее влияние на выход годной продукции. Однако в тексте автореферата отсутствует явное описание данного анализа (например, количественная оценка влияния каждой операции на вероятность возникновения дефекта).

2. Не раскрыта причина различий искажения размеров проводящего рисунка на операции фотолитографии для различных направлений печати проводников (стр. 10, рис. 3а).

3. В главе 3 для описания смещения центра отверстия относительно контактной площадки принято распределение Рэлея, однако автор не приводит обоснования выбора данного закона распределения и не описывает случаи, когда он может быть нарушен: например, наличие систематической погрешности сверления или различие дисперсий по координатным осям.

2. Отзыв на автореферат диссертации от АО «АКМЕТРОН», составленный коммерческим директором, к.т.н., Рябокулем А.С. (подпись заверена директором по персоналу Брянской А.А.), содержит следующие замечания:

1. Недостаточно полно рассмотрено применение метода для многослойных печатных плат, в которых используются дополнительные технологические операции (например, прессование и металлизация) и, как следствие, новые факторы.

2. При описании экспериментальной составляющей работы не всегда представлены количественные оценки погрешностей средств измерений: например, непонятна причина погрешностей совмещения, приведенных на рисунках 9в и 9г.

3. Практические рекомендации в работе в основном касаются отдельных технологических операций, а не организации процесса производства печатных плат в целом.

4. Выбранная автором индексация обозначений затрудняет понимание содержания.

3. Отзыв на автореферат диссертации от АО МНПК «Авионика» им. О.В. Успенского, составленный заместителем директора по качеству – Главным метрологом, к.т.н., Пагавой Л.Л. (подпись заверена помощником управляющего директора по кадрам – начальником отдела кадров Прибыловой О.Б.) содержит следующие замечания:

1. В главе 2 приводится описание процессов фотолитографии и травления и представлено соответствие экспериментальных данных нормальному распределению, однако отсутствует обсуждение ограничений применимости такого предположения и возможных отклонений при изменении технологических условий.

2. В главе 4 для приведенных способов совмещения заготовки и шаблона с помощью жидкокристаллической матрицы не приведены данные о погрешности позиционирования шаблона и о её влиянии на точность совмещения.

3. В главе 5 недостаточно или в неявном виде представлены рекомендации по практическому применению составляющих метода.

4. Отзыв на автореферат диссертации от ООО «Р-Телематика», составленный техническим директором, к.т.н., Проценко Н.А. (подпись заверена начальником отдела управления персоналом Юсуповой О.Н.), содержит следующие замечания:

1. Первая глава: методическая часть, приведенная в описании первой главы касающаяся анализа технологических процессов изготовления ПП, изложена недостаточно подробно. Автор переходит от общей постановки задачи сразу к формальному описанию модели и её параметров без детального анализа, и как следствие, в дальнейшем использует как факт ограничение области исследования до четырёх операций: фотолитографии, травления, сверления и совмещения. Это затрудняет понимание необходимости оценки результатов для сформированного перечня операций.

2. Вторая глава: результаты экспериментального исследования процесса фотолитографии и, в частности, различные результаты вероятности выхода

годной заготовки в зависимости от направления печати проводников, вероятно, характерны только для используемой автором лабораторной линии производства. Вследствие этого непонятна возможность применения модели в условиях промышленного производства.

3. Пятая глава: для методики определения конструктивно-технологических параметров печатной платы непонятен выбранный автором способ численного решения задачи поиска целевого параметра.

5. Отзыв на автореферат диссертации от АО «НПО Лавочкина», составленный ведущим научным сотрудником, д.т.н., Заниным К.А. (подпись заверена заместителем генерального директора по персоналу и общим вопросам Шолоховой И.В.), содержит следующие замечания:

1. В автореферате предлагается оценка вероятности, однако не приводится общая постановка оптимизационной задачи. Например, максимизация квантиля: количества плат, выпущенных с заданным ограничением на вероятность их годности, или максимизация вероятности годности при заданном количестве изготовленных плат.

2. Определяющим параметром качества в предлагаемой модели является ширина проводника, которая измеряется оптико-электронной системой. Однако из автореферата не ясно как разделяются законы распределения погрешности оптического измерения и непосредственно фактической толщины, без погрешности измерения.

6. Отзыв на автореферат диссертации от филиала ПАО «Яковлев» - Центр комплексирования, составленный ведущим инженером-конструктором по ЭТД и ТСО отдела разработки, сопровождения производства и эксплуатации, к.т.н., доцентом Пахомовым А.Н. (подпись заверена главным специалистом 1-й категории по работе с персоналом Департамента управления персоналом ПАО «Яковлев» Ковалевской О.А., отзыв утвержден директором-главным конструктором филиала ПАО «Яковлев» – Центр комплексирования А.А. Герасимовым), содержит следующие замечания:

1. При описании апробации алгоритмов совмещения шаблона и заготовки на лабораторном прототипе установки экспонирования не обозначены погрешности системы обратной связи (видеокамеры), что не позволяет оценить отдельно параметры погрешности, привносимой самими алгоритмами.

2. Результаты экспериментальных исследований, приведенные в главах 2, 4, 5, опираются на использование доступных автору лабораторных установок, вследствие чего затруднительна оценка применимости метода в промышленных условиях.

Несмотря на перечисленные недостатки, во всех отзывах отмечено, что диссертация отвечает предъявляемым требованиям, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата технических наук.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их большим опытом, а также высокой научно-практической компетентностью в области проектирования, разработки и технологии приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры. Высокая научная и

практическая компетентности официальных оппонентов и ведущей организации подтверждаются публикациями в научных изданиях. Оппоненты являются сотрудниками разных организаций и не имеют совместных публикаций с соискателем.

Выбор Мешкова С.А., доктора технических наук, в качестве **официального оппонента** обусловлен его профессиональной компетентностью в области конструирования радиоэлектронных приборов, включая методологические исследования, направленные на учет технологических и эксплуатационных факторов при проектировании приборов, а также разработку средств их автоматизированного вероятностного анализа. За последние 5 лет Мешков С.А. в рецензируемых отечественных и международных журналах опубликовал 7 работ по профилю диссертации.

Выбор Разживалова П.Н., кандидата технических наук, в качестве **официального оппонента** обоснован его высокой компетентностью в области разработки электронных устройств, а также исследования и оптимизации технологических операций их производства. За последние 5 лет Разживалов П.Н. имеет 5 публикаций по профилю диссертации.

Выбор ФГБУН НТЦ УП РАН в качестве **ведущей организации** обосновывается тем, что организация занимает одно из ключевых мест в разработке перспективных научных приборов и информационных систем, а также осуществляет фундаментальные, поисковые и прикладные исследования в области разработки приборов и систем измерения, анализа, управления и мониторинга. За последние 5 лет ФГБУН НТЦ УП РАН опубликовано 15 работ по теме диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

— **разработана математическая модель оценки вероятности выхода годной печатной платы** для критически значимых операций ее производства: фотолитографии, травления, совмещения и сверления, отличие которой от известных заключается в совокупном учете влияния конструктивных параметров печатных плат и погрешностей технологических процессов их изготовления;

— **предложен оригинальный метод оценки выхода годных печатных плат**, основанный на применении разработанной математической модели и обеспечивающий автоматизированное определение вероятности производства изделия, соответствующего заданным требованиям приемки, по конструктивным параметрам платы и характеристикам технологических процессов ее изготовления;

— **разработана методика определения конструктивно-технологических параметров печатной платы**, основанная на численном поиске наборов параметров, совокупно удовлетворяющих заданной целевой вероятности выхода годных;

— **разработана методика определения параметров каплевидной контактной площадки сквозного металлизированного отверстия**, основанная на решении оптимизационной задачи минимизации занимаемой ею площади для

заданного значения вероятности выхода годных, обеспечивающая уменьшение размеров контактной площадки или снижение требований к точности оборудования для сверления.

Теоретическая значимость работы обоснована тем, что разработанный метод оценки выхода годных печатных плат и содержащиеся в нем математические модели образуют научные основы для оценки и прогнозирования качества изготовления печатных плат, что способствует повышению эффективности процессов разработки и производства электронных устройств, в том числе:

- **раскрыта проблема** необходимости выбора оптимального набора конструктивно-технологических параметров конструкции печатной платы, удовлетворяющих заданным требованиям качества при снижении производственных затрат на этапах производства электронных устройств;

- **сформирован набор** конструктивно-технологических факторов для критически значимых операций ее производства (фотолитографии, травления, совмещения и сверления), для которых определены соответствующие им требования, на основе отечественных и зарубежных стандартов приемки;

- **изложены и раскрыты элементы метода** оценки выхода годных печатных плат, а также методик определения конструктивно-технологических параметров печатной платы и параметров каплевидной контактной площадки сквозного металлизированного отверстия, что способствует изменению подходов к проектированию электронных устройств.

Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что:

- **разработаны и внедрены** в АО «НИЦЭВТ» и АО «АВЭКС» *новые методы* оценки выхода годных печатных плат и *методики* определения конструктивно-технологических параметров печатной платы и параметров каплевидной контактной площадки сквозного металлизированного отверстия, что позволило уменьшить время разработки электронных устройств, увеличить точность оценки качества трассировки на этапе проектирования и увеличить эффективность использования трассировочного пространства;

- **создано программное обеспечение**, реализующее метод оценки выхода годных печатных плат, которое позволяет получить априорную количественную оценку качества печатной платы в виде вероятности ее изготовления в соответствии с предъявляемыми требованиями приемки по заданным конструктивным параметрам платы и характеристикам технологических процессов ее изготовления;

- **разработаны структурная схема, конструкция, архитектура программного обеспечения** и собранный на их основе экспериментальный образец установки прямого экспонирования, использующий для переноса проводящего рисунка на заготовку жидкокристаллическую матрицу, которая обеспечивает автоматизированное проведение операции фотолитографии.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- **теория построена** на известных законах теории вероятностей и математической статистики с применением методов обработки результатов

экспериментальных исследований, теории распознавания образов, имитационного и натурного моделирования;

— **идея базируется на формировании** количественной априорной оценки качества печатной платы в виде вероятности выхода годной *и определении* взаимосвязей между параметрами конструкции печатной платы, характеристик технологического процесса ее производства и требованиями приемки и исследовании их совокупного влияния на качество изделия;

— **использованы методы** статистического управления процессами, *требования* отечественных и международных стандартов приемки печатных плат, *метод* контроля совмещаемости топологических слоев;

— **установлено количественное совпадение результатов** моделирования, полученных с помощью разработанной автором математической модели выхода годных печатных плат и проведенного экспериментального исследования.

Личный вклад автора состоит в:

— непосредственном участии соискателя в получении исходных данных и научных экспериментах, личном участии в апробации результатов исследования, обработке и интерпретации данных, выполненных лично автором, подготовке основных публикаций по выполненной работе;

— разработке математических моделей оценки вероятности выхода годной заготовки для технологических операций фотолитографии, травления, сверления и совмещения, исследовании возможностей их применения, а также разработке математической модели оценки выхода годной печатной платы;

— разработке метода оценки выхода печатных плат, удовлетворяющих требованиям стандартов приемки, на основе анализа их конструктивно-технологических параметров и реализующего его программного обеспечения;

— разработке методики определения параметров операции фотолитографии и реализующего ее программного обеспечения, а также их апробации;

— разработке методики определения параметров каплевидных контактных площадок для сквозных металлизированных отверстий печатных плат;

— разработке и экспериментальной апробации: конструкции установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы, методик работы с ней и их программной реализации;

— разработке и исследованию способов совмещения шаблона и заготовки на этапе фотолитографии на основе применения общей матрицы перехода и конечно-элементной сетки;

— разработке и исследовании методики определения конструктивно-технологических параметров печатной платы для обеспечения заданной вероятности выхода годных;

— исследовании способов оценки качества печатных плат и выделении конструктивно-технологических параметров, влияющих на него.

В ходе защиты диссертации **не было высказано критических замечаний**, которые ставили бы под сомнение обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизну.

Соискатель Коробков М.А. обстоятельно и аргументировано ответил на все заданные ему в ходе заседания вопросы.

На заседании 25 ноября 2025 г. **диссертационный совет принял решение:**
за решение научно-технической задачи повышения качества проектирования и производства печатных плат за счет разработки и внедрения аналитического метода оценки вероятности выхода годных печатных плат на основе их конструктивных параметров, а также характеристик технологического процесса их изготовления, присудить Коробкову Максиму Андреевичу учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 6 докторов наук по специальности 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (технические науки), участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за — 13, против — нет, недействительных бюллетеней — нет.

Проректор по научной работе,
д.т.н., доцент




А.В. Иванов

Председатель диссертационного совета
24.2.327.12, д.т.н., профессор


В.И. Бусурин

Учёный секретарь диссертационного совета
24.2.327.12, к.т.н., доцент


Ф.В. Васильев

25.11.2025