

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки  
Научно-технологический центр уникального  
приборостроения Российской академии наук  
(НТЦ УП РАН)  
ОГРН 1037739516781  
ИНН/КПП 7728101310/772801001  
117342, г. Москва, улица Бутлерова, 15  
Тел: +7 (495) 333-61-02  
E-mail: np@ntcup.ru

Исх. № 10343-401-391  
«31» 10 2025г.

Проректору по научной работе  
Федерального государственного  
бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Московский авиационный  
институт (национальный  
исследовательский университет)»  
д.т.н., доценту А.В. Иванову

125993, г. Москва,  
Волоколамское шоссе, д. 4

**Уважаемый Андрей Владимирович!**

Направляю Вам отзыв ведущей организации на диссертационную работу  
Коробкова Максима Андреевича «Разработка метода оценки выхода годных  
печатных плат по их конструктивно-технологическим параметрам»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по научной специальности 2.2.9. Проектирование и технология  
приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (технические науки).

Приложение:

отзыв – на 7 листах, в 2 экземплярах.

И.о. директора



М.С. Афанасьев

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ  
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ  
ДОКУМЕНТОВ **МАИ**

«06» 11 2025г.

## «УТВЕРЖДАЮ»

Исполняющий обязанности директора  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Научно-технологического центра  
уникального приборостроения Российской  
академии наук, д.т.н., доцент

Михаил Сергеевич Афанасьев



«31»

10

2025 г.

## ОТЗЫВ

**ведущей организации на диссертационную работу Коробкова  
Максима Андреевича «Разработка метода оценки выхода годных  
печатных плат по их конструктивно-технологическим параметрам»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических  
наук по специальности 2.2.9. Проектирование и технология  
приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (технические науки)**

### *Актуальность темы работы*

В 2023 году электроника включена в перечень приоритетных направлений для обеспечения технологического суверенитета России. Создание высокотехнологичной продукции требует интеграции процессов проектирования и изготовления. В условиях повышения сложности изделий актуальными становятся работы, позволяющие оптимизировать оба эти процесса и повысить выход годных изделий, что критически важно для укрепления позиций отечественной электронной промышленности на мировом рынке. Таким образом, создание метода оценки качества печатных плат по конструктивно-технологическим параметрам является актуальной научно-технической задачей.

## *Содержание диссертационной работы*

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав с выводами, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и 6 приложений. Объем диссертации составляет 246 страниц. Работа содержит 100 рисунков и 9 таблиц. Список литературы включает 119 наименований.

Целью диссертации является повышение качества проектирования и производства печатных плат за счет разработки и внедрения аналитического метода оценки вероятности выхода годной печатной платы на основе ее конструктивных параметров, а также характеристик технологического процесса ее изготовления. Конкретные задачи работы соответствуют заявленной цели.

Во введении выделена проблемная область и обоснована актуальность темы диссертационной работы. Сформулирована цель исследования, определены объект и предмет исследования, выбраны методы исследования. Показаны научная новизна и практическая значимость результатов исследования, подтверждена их достоверность, приведены основные положения, выносимые на защиту. Представлены сведения о внедрении, публикациях и апробации результатов работы, раскрыта структура диссертационной работы. В диссертации представлены результаты большого объема исследований; личный вклад автора четко обозначен во введении.

В первой главе обоснована необходимость создания методики количественной оценки качества печатных плат, основанной на анализе проектной документации и технологии их производства. Ключевым показателем качества предложено считать вероятность изготовления печатной платы, соответствующей требованиям приемки. Анализ технологических процессов изготовления плат позволил выявить перечень критических операций, требующих детального исследования: фотолитография, травление, сверление и совмещение элементов проводящего рисунка.

Вторая глава посвящена исследованию операций фотолитографии и травления. Проанализированы факторы, определяющие выход годной продукции. Разработана математическая модель, позволяющая вычислить вероятность обеспечения допусков на отдельные конструктивные параметры печатных плат. Практическим результатом стали разработка и внедрение методики экспериментального определения параметров фотолитографии для апробации разработанной модели.

Третья глава посвящена разработке математических выражений для оценки вероятности изготовления годных контактных площадок для сквозных металлизированных отверстий. Разработана и экспериментально проверена методика определения параметров каплевидной контактной площадки, обеспечивающая увеличение вероятности ее бездефектного изготовления и экономичное использование площади платы.

В четвертой главе исследована операция совмещения шаблона и заготовки печатной платы, рассмотрены факторы, влияющие на точность этой операции, разработано выражение для оценки вероятности выхода годной заготовки. Создана экспериментальная установка прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы. Разработан алгоритм послойного совмещения на основе конечно-элементной сетки, позволяющий уменьшить диаметр контактных площадок на 0,4-0,5 мм для плат 3-го класса точности на используемом лабораторном оборудовании.

Пятая глава является логичным обобщением работы. В ней представлены итоговые результаты работы: сформулирован метод оценки выхода годных печатных плат, а также приведена его программная реализация. Разработана методика определения конструктивно-технологических параметров печатной платы, позволяющая определять необходимые значения параметров для достижения целевых показателей качества. Даны практические рекомендации по внедрению метода в производственный цикл.

***Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации***

Научную новизну исследования образуют следующие результаты:

- 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.
- 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.

- Методика определения конструктивно-технологических параметров печатной платы, основанная на численном поиске наборов параметров, совокупно удовлетворяющих заданной целевой вероятности выхода годных.
- 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.

*Значимость полученных автором диссертации результатов для соответствующей отрасли науки* заключается в том, 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.

*Практическое применение результатов* заключается в разработке комплекса методов, направленных на повышение эффективности проектирования и производства печатных плат, а также инструментов для реализации этих методов. Представленные в диссертации методы позволяют оптимизировать конструктивно-технологические параметры плат, уменьшить размеры их отдельных конструктивных элементов без снижения выхода годных изделий. Представленное диссертантом программное обеспечение позволяет оценивать вероятность выхода годных печатных плат.

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 университета МАИ.

### ***Доказательность результатов и выводов, сформулированных в работе***

Обоснованность и достоверность полученных результатов и научных положений подтверждается приемлемостью допущений; корректностью используемого автором математического аппарата при разработке математических моделей оценки вероятности выхода годной заготовки как для отдельных технологических операций, так и для процесса в целом; подтверждением полученных аналитическим путем результатов экспериментальных исследований.

Теоретические и практические результаты исследований по теме диссертации изложены в 30 работах, в том числе в 4 работах, опубликованных в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ; в 4 работах, опубликованных в научных журналах, входящих в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science; в 1 работе, опубликованной в материалах конференций, входящих в международные реферативные базы данных Scopus. Получен 1 патент на изобретение и 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Результаты работы апробированы 15 выступлениями на Международных конференциях.

### ***Краткая характеристика представленной диссертационной работы***

Диссертационная работа охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, имеет непротиворечивую методологическую платформу и взаимосвязанность выводов.

Содержание работы соответствует заявленной теме, цели и задачам исследования, а также научной специальности 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (технические науки), так как содержащиеся в ней научные результаты соответствуют пунктам 1, 2 и 8 паспорта специальности.

В диссертации полностью раскрыты все основные проблемы и выводы проведённого исследования, чётко отражены все полученные автором новые научные результаты и положения, выносимые на защиту, а предложенные решения аргументированы и оценены. Части диссертационной работы органично связаны между собой, работа характеризуется последовательностью изложения и написана грамотным научно-техническим языком.

### ***Замечания***

При рассмотрении диссертационной работы были выявлены следующие замечания, которые могут быть учтены в будущих исследованиях:

- 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.;
- в работе не рассмотрено влияние операции прессования на вероятность выхода годных печатных плат, хотя согласно разделу 1.5 она вносит существенный вклад;
- 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;
- в разработанном прототипе установки прямого экспонирования система обратной связи положения заготовки на рабочем поле не учитывает дисторсию оптической системы;
- 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.

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

### ***Согласованность автореферата и диссертации***

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

### ***Общее заключение о диссертации***

Диссертационная работа «Разработка метода оценки выхода годных печатных плат по их конструктивно-технологическим параметрам» 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 Коробкова Максима Андреевича «Разработка метода оценки выхода годных печатных плат по их конструктивно-технологическим параметрам» рассмотрен на научно-техническом семинаре НИО-2 НТЦ УП РАН и одобрен на заседании ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, протокол № 77 от «20» октября 2025 года.

**Отзыв составил**  
заведующий отделом  
акустооптических информационных  
систем (НИО-2) НТЦ УП РАН,  
доктор физико-математических наук



Пожар Витольд Эдуардович

**Адрес:** 117342, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 15

**Тел.:** +7 (495) 333-61-02

**Адрес электронной почты:** [np@ntcup.ru](mailto:np@ntcup.ru)

На включение персональных данных, содержащихся в отзыве, в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку согласны.

Подпись Пожара Витольда Эдуардовича заверяю

Заместитель директора



Чуриков Д.В.

С отзывом ознакомлен  


06.11.2025