

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Коробкова Максима Андреевича на тему: «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 диссертационной работы

Классическая практика проектирования электронных приборов включает в себя последовательно выполняемые этапы системо- и схемотехнического, конструкторского проектирования, а также технологической подготовки производства, вследствие чего параметры конструкции изделия определяются исходя из сформированных на ранних этапах проектирования показателей назначения устройства, а параметры технологических операций и необходимая оснастка формируются исходя из параметров конструкции. Такой подход предполагает подстройку технологического процесса изготовления изделия под требования и ограничения конструкции, что практически неприменимо в существующих реалиях организации производственных процессов печатных плат. Это обусловлено уменьшением количества предприятий, самостоятельно обеспечивающих полный производственный цикл, вследствие чего разработкой и изготовлением занимаются разные предприятия, и задачей технологической подготовки становится изменение конструкции под имеющиеся технологические возможности производства.

В силу данного обстоятельства традиционно применяемая линейная методика проектирования не позволяет достичь оптимального сочетания показателей назначения и показателей технологичности, одной из количественных характеристик которой может служить вероятность выхода годных изделий в заданных условиях производства. Актуальной задачей видится разработка метода оценки выхода годных печатных плат по их конструктивно-технологическим параметрам, позволяющего конструктору и технологу априорно количественно определить взаимное соответствие параметров спроектированной конструкции платы и параметров технологических операций ее производства.

Таким образом, считаю, что диссертационная работа Коробкова М.А. направлена на решение актуальной научно-технической задачи.

Содержание диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Объем работы составляет 246 страниц, в том числе 202 страниц

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«10» 11 2025 г.

основного текста. Работа включает 100 рисунков и 9 таблиц. Список литературы включает 119 наименований.

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 первой главе исследованы существующие подходы для оценки качества печатных плат. В качестве основы разработки количественной оценки качества печатных плат выбраны методы статистического управления процессами. Разработана концепция, согласно которой качество печатной платы оценивается вероятностью выхода годной продукции после завершения технологического процесса. Критерием годности является соответствие параметров печатной платы требованиям стандартов приемки, определяющих технические требования к изделию. На основе декомпозиции химических технологических процессов изготовления печатных плат, как наиболее распространенных в настоящее время, для реализации концепции выделены ключевые технологические операции: фотолитография, травление, сверление и совмещение.

Во второй главе произведен анализ технологических операций воспроизведения проводящего рисунка на одном слое печатной платы: фотолитографии и травления. Установлены влияющие на вероятность выхода годной заготовки на данных операциях параметры конструкции печатной платы, характеристики технологических операций ее изготовления и требования стандартов приемки ГОСТ Р 55693-2013 и IPC-A-600G. Разработана и экспериментально апробирована математическая модель вероятности выхода заготовки, соответствующей требованиям приемки по критериям допустимой ширины проводника и зазора между проводниками, для операций фотолитографии и травления. Разработана и апробирована методика экспериментального определения параметров фотолитографии. Ее применение позволило в 2,7 раза уменьшить топологические нормы по ширине проводника и зазора на лабораторной линии изготовления печатных плат.

В третьей главе приведен процесс создания модели оценки вероятности изготовления годной контактной площадки сквозного металлизированного отверстия в зависимости от конструктивных параметров проекта платы. Проведенное математическое моделирование показало, что изменение класса применения оказывает незначительное влияние на вероятность выхода годной контактной площадки, что обусловлено значительно более жесткими требованиями, накладываемыми на область соединения проводника и контактной площадки. Разработана методика определения параметров

каплевидной контактной площадки, обеспечивающая увеличение вероятности ее бездефектного изготовления при экономичном использовании трассировочного пространства. Применение методики позволяет снизить требования к точности используемого для сверления оборудования (в рассмотренных примерах получено снижение требуемой точности от 1,5 до 5 раз в зависимости от класса применения и конструктивных параметров печатной платы).

В четвертой главе сформирована обобщенная модель оценки вероятности выхода годной заготовки для процесса совмещения как совокупной вероятности попадания всеми отверстиями в соответствующие контактные площадки. Сформировано условие объединения моделей процессов сверления и совмещения. Проведено экспериментальное исследование операции совмещения в процессе фотолитографии. Разработана конструкция установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы и изготовлен на ее основе экспериментальный образец, с помощью которого: подтверждена работоспособность предложенной технологии; определены параметры операции сформированы алгоритмы и разработано программное обеспечение для создания шаблонов из производственных файлов и кодирования изображений шаблонов для вывода на матрицу. Разработан и экспериментально апробирован алгоритм совмещения на основе конечно-элементной сетки. С помощью разработанной модели проведена оценка качества операции совмещения, реализованного с использованием разработанных алгоритмов. Для рассмотренной реализации операции определена возможность обобщения числовых параметров распределения смещения координат топологии относительно эталона. Определено, что применение совмещения на основе конечно-элементной сетки для изделий с классом применения 3 позволяет уменьшить диаметр контактной площадки на 0,4–0,5 мм.

В пятой главе произведено объединение результатов исследований для отдельных технологических операций. Разработана математическая модель оценки вероятности выхода годной печатной платы с учетом критически значимых операций производства: фотолитографии, травления, совмещения и сверления. Разработан 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. Для реализации метода разработано программное обеспечение, обеспечивающее автоматизированный расчет вероятности выхода печатной платы в виде модуля, интегрированного в архитектуру программного обеспечения установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы. Разработана методика определения конструктивно-технологических параметров печатной платы, основанная на

численном поиске наборов параметров, совокупно удовлетворяющих заданной целевой вероятности выхода годных. Проведена адаптация разработанной методики численного определения конструктивно-технологических параметров печатной платы для отдельных операций фотолитографии и травления, сверления и совмещения. Сформированы рекомендации по практическому применению составляющих метода оценки выхода годных печатных платы, определяющие возможности применения метода на отдельных этапах производственного цикла электронных устройств.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В приложениях приведены: копии актов о внедрении результатов работы на предприятиях и использовании в учебном процессе; копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и патента на изобретение; листинг программы компьютерной обработки изображений для определения параметров операции фотолитографии; математические выкладки, используемые при разработке модели вероятности выхода годной контактной площадки для процесса сверления; таблица статистических характеристик смещения координат реперных точек относительно эталона, полученная при исследовании процесса совмещения; листинг программного обеспечения, реализующего метод оценки вероятности выхода годных печатных плат.

В целом диссертационная работа Коробкова М.А. является законченным научным исследованием, в котором решается актуальная задача повышения 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.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе

Обоснованность теоретических положений обусловлена корректным использованием классических методов теории вероятностей, математической статистики, положений технологии приборостроения, управления качеством радиоэлектронной аппаратуры, методов оптимального проектирования.

Достоверность полученных в диссертационной работе научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена совпадением теоретических результатов, полученных с помощью разработанных математических моделей и методов, с результатами, полученными экспериментально. Полученные результаты не противоречат известным положениям в исследуемой области.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях с 2019 г. по 2024 г. По теме диссертации опубликовано 30 работ, в том числе четыре статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий

Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования РФ, четыре статьи в ведущих научных журналах, входящих в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science, а также одна работа в материалах конференций, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus. По результатам работы получен 1 патент на изобретение и 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Научная новизна полученных результатов

Разработана обобщенная математическая модель оценки вероятности выхода годной печатной платы в заданных условиях производства. Модель основана на разработанных автором частных математических моделях оценки вероятности выхода годной заготовки платы для наиболее значимых операций производства: фотолитографии, травления, сверления, совмещения. Модель позволяет решить как прямую (оценка вероятности получения годной печатной платы заданной конструкции в рамках определенного по структуре и точности технологического процесса производства) задачу анализа, так и обратную (определение конструктивно-технологических параметров печатной платы, обеспечивающих требуемую вероятность выхода годных) задачу синтеза. Решение задачи синтеза основано на целенаправленном численном поиске конструктивно-технологических параметров, обеспечивающих целевое значение вероятности выхода годных.

Разработан метод определения параметров каплевидной контактной площадки сквозного металлизированного отверстия, основанный на решении оптимизационной задачи минимизации занимаемой ею площади для заданного значения вероятности выхода годных, позволяющий уменьшить размеры контактной площадки и увеличить тем самым доступное пространство для прокладки межсоединений или снизить требования к точности оборудования для сверления.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры. Результаты, составляющие научную новизну, соответствуют указанным в паспорте специальности направлениям исследований 1, 2 и 8 в контексте научного обоснования новых методов проектирования систем контроля и диагностирования радиоэлектронной аппаратуры, разработки новых математических моделей систем контроля и диагностирования и разработки методов и средств управления качеством приборостроительного производства.

Научная и практическая ценность выводов и результатов

Основную научную ценность работы составляет математическая модель оценки вероятности выхода годных печатных плат в заданных условиях производства, которая может рассматриваться как значимое звено системы научных знаний в области управления качеством печатных плат на этапах их

проектирования. Это позволяет повысить эффективность процессов создания электронных устройств на основе печатных плат.

Практическую ценность работы составляют следующие результаты:

Инженерная методика, реализованная в виде программного обеспечения, которая позволяет получить априорную количественную оценку вероятности изготовления печатной платы в соответствии с предъявляемыми требованиями приемки по заданным конструктивным параметрам и характеристикам технологического процесса изготовления, а также определить рекомендуемые значения параметров конструкции для выполнения требований производства, или определить необходимые параметры производства для изготовления спроектированной печатной платы. Программный продукт пригоден для внедрения в современные системы автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства и позволяет снизить трудоемкость проектирования и производства печатных плат. Разработаны рекомендации по практическому применению методики для отдельных операций процесса производства плат. Получены конструктивные параметры печатных плат, соответствующих требованиям производства.

Инженерная методика определения параметров каплевидной контактной площадки сквозного металлизированного отверстия, обеспечивающая уменьшение размеров контактной площадки или снижение требований к точности оборудования для сверления. Получены инженерные решения, обеспечивающие снижение требуемой точности оборудования от 1,5 до 5 раз в зависимости от класса применения и конструктивных параметров печатной платы.

Результаты работы внедрены в АО «НИЦЭВТ» и АО «АВЭКС» и используются в учебном процессе МАИ, что подтверждено актами внедрения (Приложение А).

Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации

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

Замечания по диссертационной работе и автореферату

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 автором методик и алгоритмов на приведенных примерах. Представляется целесообразным продемонстрировать эффективность разработанных методик в условиях серийного производства.

Однако указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на положительную оценку диссертационной работы Коробкова М.А. в целом

Заключение о соответствии диссертации критериям Положения о присуждении ученых степеней

Диссертационная работа Коробкова Максима Андреевича «Разработка метода оценки выхода годных печатных плат по их конструктивно-технологическим параметрам» является завершённой 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.

Считаю, что 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).

Согласен с включением моих персональных данных в аттестационное дело соискателя Коробкова М.А. и их дальнейшей обработкой.

Официальный оппонент

Мешков Сергей Анатольевич, доктор технических наук по специальности 05.11.14 «Технология приборостроения», доцент, профессор кафедры «Технологии приборостроения» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)».

105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5,

стр. 1.

Телефон: +7 (499) 263-63-91

Электронная почта: sb67241@mail.ru

« 10 » ноября 2025 г.



С.А. Мешков

Сведения о Мешкове Сергее Анатольевиче подтверждаю

специально по персоналу



(должность)

М.П.

[Signature]
(подпись)

Леванцева Н.О.
(Фамилия И.О.)

С ответом ознакомлен



10.11.2025