

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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 выбранной автором темы

Создание конкурентоспособной и экономически эффективной электронной продукции, особенно для техники ответственного назначения, требует сокращения сроков и затрат на разработку при одновременном обеспечении надежности. Печатные платы и узлы на их основе являются ключевыми компонентами современных электронных устройств, и их качество непосредственно влияет на надежность конечной аппаратуры. Возрастающая сложность проектирования печатных плат требует тесного взаимодействия между проектировщиками и производственными специалистами. Однако на практике интеграция между этими командами ослабевает. Проектировщики и технологи часто не имеют прямых контактов из-за увеличения количества контрагентов: в процессе разработки есть широкий выбор предприятий-изготовителей, каждое из которых обладает своим уникальным набором возможностей, и в то же время производители удовлетворяют потребности множества разных потребителей. В результате проектные решения не учитывают производственные ограничения, что повышает риск невозможности изготовления сложных конструкций с требуемым качеством и надежностью.

Данные проблемы затрудняют достижение оптимального баланса между сложностью платы и производственными возможностями при минимальных затратах. Это ухудшает качество проектных решений, увеличивает количество ошибок и дефектов, а также снижает надежность готовых изделий. Таким образом, актуальной задачей является разработка методов априорной количественной оценки качества печатных плат, адекватно учитывающих как конструктивные параметры топологии, так и влияние технологического процесса изготовления.

Рассмотрение содержания

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

Во введении определена проблематика и обоснована актуальность темы исследования, поставлена цель исследования, определены объект и предмет исследования, выбраны методы исследования, сформулирована научная новизна и практическая ценность результатов исследования, достоверность полученных результатов. Приведены основные положения, выносимые на защиту, а также сведения о внедрении результатов работы и их апробации. Описана структура диссертационной работы.

В первой главе проанализированы существующие методы оценки качества печатных плат. В качестве базового подхода выбраны методы статистического управления процессами (SPC). Разработана концепция оценки качества печатной платы через вероятность получения продукции, соответствующей предъявленным к ней требованиям, после завершения технологического процесса. На основе анализа химических технологий производства печатных плат выделены ключевые операции: фотолитография, травление, сверление и совмещение.

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«31» 10 2025

Во второй главе исследованы операции формирования проводящего рисунка — фотолитография и травление. Определены параметры конструкции печатной платы, характеристики технологических процессов и требования стандартов приемки, влияющие на выход годных заготовок на рассматриваемых операциях. Разработана и апробирована математическая модель оценки вероятности соответствия заготовки требованиям по ширине проводников и зазоров. Применение методики экспериментального определения параметров фотолитографии позволило в 2,7 раза уменьшить топологические нормы на используемой автором лабораторной линии.

В третьей главе представлена модель оценки вероятности изготовления годных контактных площадок сквозных металлизированных отверстий. Разработана методика проектирования каплевидных контактных площадок, повышающая вероятность их бездефектного изготовления. Применение методики позволяет снизить требования к точности сверлильного оборудования в 1,5–5 раз.

В четвёртой главе создана обобщённая модель оценки вероятности выхода годных заготовок при совмещении, основанная на совокупной вероятности точного позиционирования отверстий относительно контактных площадок. Разработана установка прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы, созданы алгоритмы и программы для ее функционирования. Разработан и апробирован алгоритм совмещения шаблона и заготовки на основе конечно-элементной сетки. Использование алгоритма позволило на 0,4–0,5 мм уменьшить диаметр контактной площадки для изделий 3-го класса применения.

В пятой главе объединены результаты исследований для отдельных операций. Разработана комплексная математическая модель оценки вероятности выхода годных печатных плат, учитывающая влияние критических операций их производства, а также метод на ее основе. Создано программное обеспечение для автоматизированного расчёта вероятности изготовления печатных плат по заданным параметрам. Предложена методика определения конструктивно-технологических параметров печатной платы, позволяющая найти набор параметров для обеспечения целевой вероятности выхода годных. Сформированы рекомендации по практическому применению метода на различных этапах производственного цикла.

В заключении приведены наиболее важные научные результаты диссертационной работы.

В приложении представлены копии актов о внедрении результатов работы; свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и патент на изобретение; исходные коды разработанных программ; математический вывод уравнения, используемого в третьей главе работы; таблицу с результатами эксперимента.

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

Научная новизна полученных результатов

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.

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.

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.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов, выводов и заключений подтверждена результатами математического моделирования и экспериментальными исследованиями. Предложенные в диссертационной работе методы, методики и алгоритмы теоретически обоснованы, а также не противоречат известным положениям.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, прошли апробацию на международных и всероссийской научно-технических конференциях 2019–2024 годов. По теме диссертации опубликовано 30 работ, в т.ч. 4 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, 4 статьи — в журналах, входящих в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science, 1 — в материалах конференций, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus. Получен 1 патент на изобретение и 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Научная и практическая значимость выводов и результатов

Теоретическая значимость работы состоит в том, что разработанный метод оценки выхода годных печатных плат и соответствующие математические модели формируют научную основу для оценки и прогнозирования качества изготовления печатных плат, способствуя повышению эффективности процессов разработки и производства электронных устройств.

Предложенная автором методика определения конструктивно-технологических параметров печатной платы позволяет установить оптимальные значения конструктивных параметров, соответствующие производственным требованиям. Разработанная методика проектирования каплевидной контактной площадки для сквозных металлизированных отверстий дает возможность снизить требования к точности сверлильного оборудования. В исследованных случаях достигнуто снижение требуемой точности в 1,5–5 раз в зависимости от класса применения и конструктивных параметров платы. Программное обеспечение метода оценки выхода годных печатных плат обеспечивает получение оценки качества в виде вероятности изготовления платы согласно требованиям приемки и создает предпосылки для интеграции метода в цифровые производственные системы с целью снижения трудоемкости проектирования и повышения экономической эффективности производства. Методика экспериментального определения параметров фотолитографии позволяет минимизировать влияние процесса на изменение ширины изготавливаемых проводников. В исследованных случаях внедрение компенсации систематической погрешности в производственные файлы проекта позволило в 2,7 раза уменьшить минимальную воспроизводимую ширину проводника. Разработаны структурная схема, конструкция и архитектура программного обеспечения установки экспонирования, использующей

жидкокристаллическую матрицу для переноса проводящего рисунка и исключаяющей использование физических фотошаблонов. На их основе создан прототип, обеспечивающий автоматизированное выполнение операции фотолитографии. Создан и апробирован оригинальный алгоритм совмещения на основе конечно-элементной сетки. Его применение на опытном образце установки прямого экспонирования позволило в 2,3 раза уменьшить минимально допустимое значение пояски площадки переходного отверстия в рассмотренных примерах.

Результаты работы внедрены в АО «НИЦЭВТ», АО «АВЭКС» и МАИ, что подтверждено соответствующими актами.

Замечания по диссертации и автореферату

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.

Указанные замечания не снижают ценность и качество научно-исследовательской работы и не являются определяющими.

Заключение о соответствии работы требованиям ВАК

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).

Считаю, что 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».

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

Официальный оппонент

Разживалов Павел Николаевич, кандидат технических наук по специальности 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники», заместитель директора института нано- и микросистемной техники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».

124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь

Шокина, дом 1

Заместитель директора института нано- и микросистемной техники

Телефон:

+7 (499) 731-4441

Электронная почта:

razzhivalovpavel@gmail.com

« 29 » октября 2025 г.

П.Н. Разживалов

Подпись официального оппонента Разживалова Павла Николаевича, к.т.н., заместитель директора института нано- и микросистемной техники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» удостоверяю.

(должность)

М.П.



(подпись)

(Фамилия И.О.)

С ответом
31.10.25