

На правах рукописи



Коробков Максим Андреевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ВЫХОДА ГОДНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ
ПО ИХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

2.2.9. Проектирование и технология приборостроения
и радиоэлектронной аппаратуры

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2025

Работа выполнена на кафедре 307 «Цифровые технологии и информационные системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель:

Васильев Федор Владимирович, кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Мешков Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)», кафедра «Технологии приборостроения», профессор.

Разживалов Павел Николаевич, кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», институт нано- и микросистемной техники, заместитель директора.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук.

Защита диссертации состоится «25» ноября 2025 года в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.12 на базе Московского авиационного института по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского авиационного института по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4 и на сайте: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=185938

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

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



Ф.В. Васильев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Одним из основных элементов современных электронных устройств являются печатные платы (ПП), что обусловлено высокой степенью автоматизации процесса их изготовления, тем самым обеспечивая высокую технологичность разрабатываемой конструкции и низкую себестоимость конечного изделия. Для соответствия современным требованиям с учетом усложнения конструкции ПП необходимо обеспечение тесного взаимодействия между инженерами-разработчиками и производственными специалистами. Однако, это противоречит сформировавшейся тенденции физического разделения производственного процесса, в которой разработкой занимаются дизайн-центры, а изготовлением — отдельные предприятия.

Решения, принятые на этапе разработки ПП и обеспечивающие соответствие ее конструкции техническим требованиям, не всегда учитывают особенности изготовления, что приводит к увеличению количества производимого брака и сроков разработки. Кроме того, стратегия запуска производства партии конструктивно сложных ПП определяется технологом на предприятии-изготовителе вручную и неверная оценка им соответствия проекта ПП возможностям производства может привести к непокрытым издержкам и срыву сроков. В таком случае одним из возможных способов повышения выхода годных ПП является использование количественной оценки качества ПП, обеспечивающей на всех этапах производственного цикла единое представление о качестве ПП и пригодной для расчета в системах автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства.

Качество ПП определяется комплексом факторов, связанных с процессами ее проектирования, конструирования, технологической подготовки и производства. Большой вклад в область научного и практического обеспечения и контроля качества электронных устройств на этапах разработки, производства и эксплуатации внесли советские и российские ученые: А.М. Медведев, В.И. Иевлев, Н.К. Юрков, Ю.Б. Цветков и др.; а также зарубежные ученые М. Пэрриш (M. Parrish), Р. Невес (R. Neves), Н. Паско (N. Pascoe) Ф. Дженсен (F. Jensen) и др. Однако, существующие методы контроля качества ПП обладают следующими недостатками:

- 1) методы предполагают апостериорное использование, т. е. после этапа изготовления: контроль качества в таком случае представляет собой проверку образцов на соответствие требованиям стандартов приемки различными способами (с помощью систем автоматической оптической инспекции и рентгеновского контроля, испытаний образцов и т. д.), а выявленные недостатки конструкции могут быть исправлены только в следующей версии проекта ПП;
- 2) существующие стандарты приемки определяют только конечные требования к изделию, но не содержат рекомендаций по их обеспечению на этапе разработки, т. е. не определена четко выраженная связь между параметрами конструкции и качеством изготовленной ПП.

Описанные недостатки существующих методов определяют ограниченные возможности их априорного применения, поэтому актуальной задачей является разработка метода количественной оценки качества ПП, который позволяет уже на этапе проектирования получить величину оценки в виде вероятности выхода годной ПП в зависимости от предъявляемых к ней требованиям, конструктивных параметров топологии и влияния технологического процесса ее изготовления.

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.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие задачи:

- 1) исследование влияния конструктивно-технологических параметров на выход годных заготовок на операциях изготовления печатных плат;
- 2) разработка и апробация моделей оценки вероятности выхода годной заготовки на исследуемых технологических операциях;
- 3) объединение результатов исследования для отдельных технологических операций в единый метод оценки выхода годных печатных плат;
- 4) разработка рекомендаций по практическому применению составляющих метода для определения конструктивных параметров печатной платы на основе информации о технологическом процессе ее изготовления.

Объектом исследования являются печатные платы и технологические процессы их изготовления.

Предметом исследования являются методы, математические модели и алгоритмы оценки и прогнозирования качества изготовления печатных плат.

Научная новизна работы:

— 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.

Теоретическая значимость работы 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.

Практическая значимость результатов исследования:

— Методика определения конструктивно-технологических параметров для печатной платы позволяет определить рекомендуемые значения параметров конструкции печатной платы для выполнения требований производства или решить обратную задачу — определить необходимые параметры производства для изготовления спроектированной печатной платы.

— Методика определения параметров каплевидной контактной площадки сквозного металлизированного отверстия 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, а также конструктивных параметров печатной платы).

— Реализующее метод оценки выхода годных печатных плат программное обеспечение, 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, что обеспечивает возможность внедрения метода в цифровые информационные технологии для снижения трудоемкости проектирования и повышения экономичности производства печатных плат.

— Методика экспериментального определения параметров операции фотолитографии позволяет минимизировать влияние процесса на изменение параметра ширины проводника; введение в производственные файлы проекта печатной платы компенсации систематической составляющей погрешности, определенной по разработанной методике, уменьшило минимальную воспроизводимую ширину проводника в 2,7 раза.

— Структурная схема, конструкция, архитектура программного обеспечения и собранный на их основе опытный образец установки прямого экспонирования, использующей для переноса проводящего рисунка на заготовку жидкокристаллическую матрицу и обеспечивающей автоматизированное проведение операции фотолитографии.

— Разработан и апробирован оригинальный алгоритм совмещения заготовки и шаблона на операции фотолитографии, основанный на применении конечно-элементной сетки. Реализация алгоритма на опытном образце установки прямого экспонирования позволила уменьшить минимально допустимое проектируемое значение пояса площадки переходного отверстия в 2,3 раза на рассмотренных примерах.

Методы исследования. Проведенное исследование опирается на методы теории вероятности и математической статистики, теории обработки результатов экспериментальных исследований, теории распознавания образов, имитационного и натурального моделирования, линейной алгебры и аналитической геометрии.

Положения, выносимые на защиту:

— Математическая модель оценки вероятности выхода годной печатной платы позволяет априорно определить вероятность соответствия изготовленной печатной платы требованиям приемки по конструктивным параметрам печатной платы и технологическим характеристикам процессов ее производства.

— Метод оценки выхода годных печатных плат обеспечивает автоматизированное определение вероятности производства изделия, соответствующего заданным требованиям

приемки, по конструктивным параметрам платы и параметрам технологических процессов ее производства.

— Методика определения конструктивно-технологических параметров печатной платы позволяет сформировать наборы параметров, совокупно удовлетворяющих заданной целевой вероятности выхода годных.

— Методика определения параметров каплевидной контактной площадки сквозного металлизированного отверстия обеспечивает уменьшение размеров контактной площадки с сохранением величины вероятности выхода годных или снижение требований к точности оборудования для сверления.

Достоверность полученных результатов подтверждается обоснованностью допущений и преобразований при разработке математических моделей метода оценки вероятности изготовления печатных плат, удовлетворяющих требованиям приемки, а также соответствием полученных экспериментальных и аналитических результатов.

Внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены в АО «НИЦЭВТ», АО «АВЭКС», а также используются в учебном процессе МАИ.

Апробация работы. Основные научные и прикладные результаты докладывались и обсуждались на: 18-ой, 19-ой, 20-ой, 21-ой, 22-ой, 23-ей Международных конференциях «Авиация и космонавтика (2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024; Москва, МАИ); XLVI, XLVII, XLVIII, XLIX, L Международных конференциях «Гагаринские чтения» (2020, 2021, 2022, 2023, 2024; Москва, МАИ); XIV Всероссийском межотраслевом молодежном конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (2022; Москва, МАИ); Всероссийском молодежном конкурсе научно-технических работ «Орбита молодежи» (2024; Госкорпорация «Роскосмос»); XIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике (2024; Москва, НИЯУ МИФИ); Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (2024; Сочи).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 работ, в том числе 4 в рецензируемых изданиях Перечня ВАК, 4 в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных Scopus и Web of Science, 1 в материалах конференций, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus, 1 патент на изобретение и 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав с выводами, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и 6 приложений. Общий объём диссертации составляет 246 страниц, из них 202 — основная часть, 44 — приложение. Работа содержит 100 рисунков и 9 таблиц. Список литературы включает 119 наименований.

Личный вклад автора в работы, написанные в соавторстве, заключается в получении результатов исследований, выносимых на защиту и составляющих научную новизну и практическую значимость работы, а именно в:

— 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 [2–10, 14, 16, 18, 23, 27–29];

— разработке метода оценки выхода печатных плат, удовлетворяющих требованиям стандартов приемки, на основе анализа их конструктивно-технологических параметров и реализующего его программного обеспечения [2, 5, 8, 20, 21, 26];

— разработке методики определения параметров операции фотолитографии и реализующего ее программного обеспечения, а также их апробации [1–4, 23, 26];

— разработке методики определения параметров каплевидных контактных площадок для сквозных металлизированных отверстий печатных плат [8, 18];

— разработке и экспериментальной апробации: конструкции установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы, методик работы с ней и их программной реализации [1, 2, 4, 11, 19, 22, 26, 30];

— разработке и исследованию способов совмещения шаблона и заготовки на этапе фотолитографии на основе применения общей матрицы перехода и конечно-элементной сетки [2, 4, 26–30];

— разработке и исследовании методики определения конструктивно-технологических параметров печатной платы для обеспечения заданной вероятности выхода годных [21–23];

— исследовании способов оценки качества печатных плат и выделении конструктивно-технологических параметров, влияющих на него [2, 6–9, 12, 13, 15, 17, 27–29].

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

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 на основе анализа направлений развития электроники в целом и печатных плат (ПП) в частности определена необходимость в формировании количественной оценки качества ПП по ее проектной документации и производственным файлам, которая будет учитывать как конструктивные параметры ПП, так и параметры технологического процесса (ТП) ее производства. Для конструктора и технолога подобная оценка —дополнительный источник информации о соответствии разработанной конструкции технологическим возможностям конкретного производства, который позволит до передачи проекта в производство оптимизировать конструкцию ПП и, тем самым, снизить время разработки устройства за счет уменьшения количества итераций при изготовлении прототипов, а также уточнить необходимый размер производимой партии с учетом оценки доли дефектной продукции, которая не будет соответствовать стандартам приемки.

В качестве научных основ для формирования количественной оценки качества ПП выбраны методы статистического управления процессами (Statistical Process Control, SPC), на основе которых сформирована общая схема метода оценки выхода годной ПП (Рисунок 1).

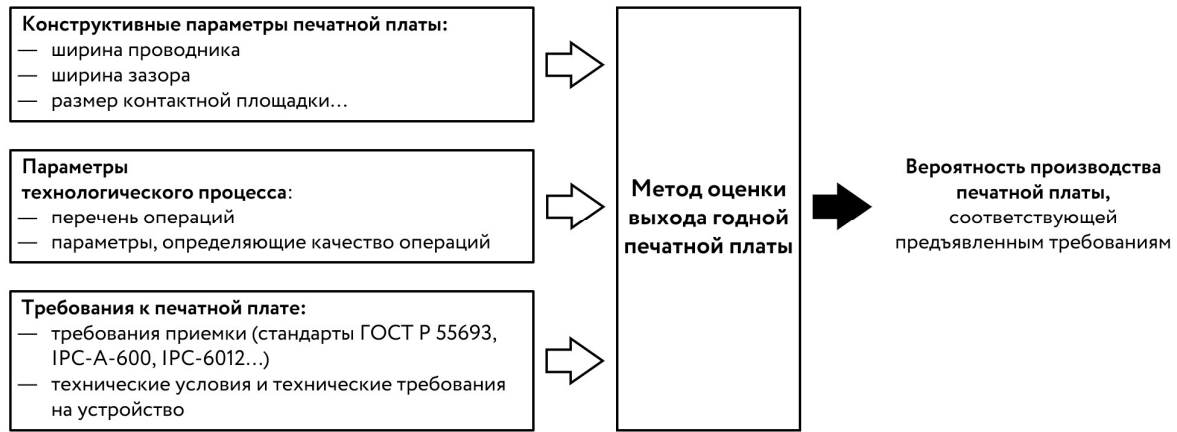


Рисунок 1 — Общая схема метода оценки выхода годной ПП

Метод оперирует со следующими исходными данными:

- конструктивные параметры ПП, определяемые в ходе ее разработки и задаваемые в системе автоматизированного проектирования (ширины проводников и зазоров между проводниками, диаметр и размер переходного металлизированного отверстия и т. д.);
- параметры ТП изготовления ПП, которые представляют собой характеристики технологических операций, определяющие изменение конструктивных параметров заготовки в процессе ее обработки;
- требования к ПП, сформированные на основе технических условий (ТУ), технических требований (ТТ), критериев приемки стандартов (ГОСТ Р 55693–2013, IPC-A-600 и др.) и определяющие контролируемую характеристику и границы допуска ее варьирования.

Количественным показателем качества ПП, получаемым с помощью применения метода, является вероятность изготовления ПП в соответствии с предъявляемыми к ней требованиями приемки, т. е. вероятность того, что значения всех контролируемых характеристик ПП после ее изготовления попадут в сформированные поля допуска.

В заключительной части первой главы произведен анализ технологических процессов изготовления ПП и на основе совокупного рассмотрения величин привносимых погрешностей на отдельных технологических операциях и количестве выполнения этих операций в технологических процессах сформирован перечень подлежащих исследованию критических технологических операций, включающий в себя: фотолитографию, травление, сверление и совмещение элементов проводящего рисунка.

Во второй главе описан процесс разработки модели оценки вероятности выхода годной заготовки для процессов фотолитографии и травления. Сначала произведено обособленное рассмотрение процесса фотолитографии, для которого в качестве предъявленного требования приемки является соответствие геометрических размеров элементов топологии, заложенных в конструкторской документации на ПП и полученных в результате операции на маскирующем слое фоторезиста. При описании процесса использованы допущения: проводящий рисунок — совокупность проводящих дорожек и зазоров между ними, которые описываются параметром ширины; под шириной проводника после фотолитографии подразумевается ширина фоторезистивной маски. Конструктивными параметрами ПП, влияющими на результат фотолитографии, являются ширина проводника и ширина зазоров между проводниками, а критерий выхода годной заготовки — их изменение в допустимых пределах, определяемых,

например, по стандарту приемки ГОСТ Р 55693–2013, в котором поле допуска определяется классом применения изделия (класс 1 — потребительская продукция, класс 2 — промышленное оборудование, класс 3 — устройства ответственного назначения).

В результате исследования процесса фотолитографии сформированы обобщенные параметры, позволяющие количественно охарактеризовать привносимые дефекты в контексте их влияния на ширину проводника: искажение размеров проводящего рисунка, выраженное разницей между средней шириной изготовленного проводника и проектным значением и определяющее систематическую погрешность операции, и неровность воспроизведения края проводника, характеризующая разброс положения края проводника по его длине и определяющая случайную погрешность операции.

Считая ширину проводника после фотолитографии случайной величиной, вероятность P_{expo} выхода заготовки, соответствующей требованиям приемки, на операции определяется формулой (1):

$$P_{expo} = \int_{(1-k_{min})w_{tr,d}}^{(1+k_{max})w_{tr,d}} f_{tr_expo}(w, w_{tr,d}, \delta_{expo}, \xi) dw, \quad (1)$$

где: $w_{tr,d}$ — проектируемая ширина проводника и зазора (предполагается, что ширины проводников и зазоров между ними одинакова), f_{tr_expo} — функция плотности вероятности ширины проводника после фотолитографии; w — параметр ширины проводника; k_{max} и k_{min} — коэффициенты, характеризующие изменение ширины проводника в большую и меньшую стороны в зависимости от требуемого класса применения (класс 1: $k_{max} = k_{min} = 0,3$; класс 3: $k_{max} = k_{min} = 0,2$); δ_{expo} — параметр искажения размеров рисунка, характеризующий систематическую погрешность операции и связанный с деформацией фотошаблона, ошибками растеризации и т. д.; ξ — параметр неровности края проводника, характеризующий случайную погрешность операции и связанный с неравномерной экспозицией и толщиной нанесенного фоторезиста по поверхности заготовки, низкой контрастностью фотошаблона и т. д.

Для экспериментального определения закона распределения ширины проводника после фотолитографии и его параметров разработана соответствующая методика (Рисунок 2), а также проведена ее апробация на лабораторной линии производства ПП.

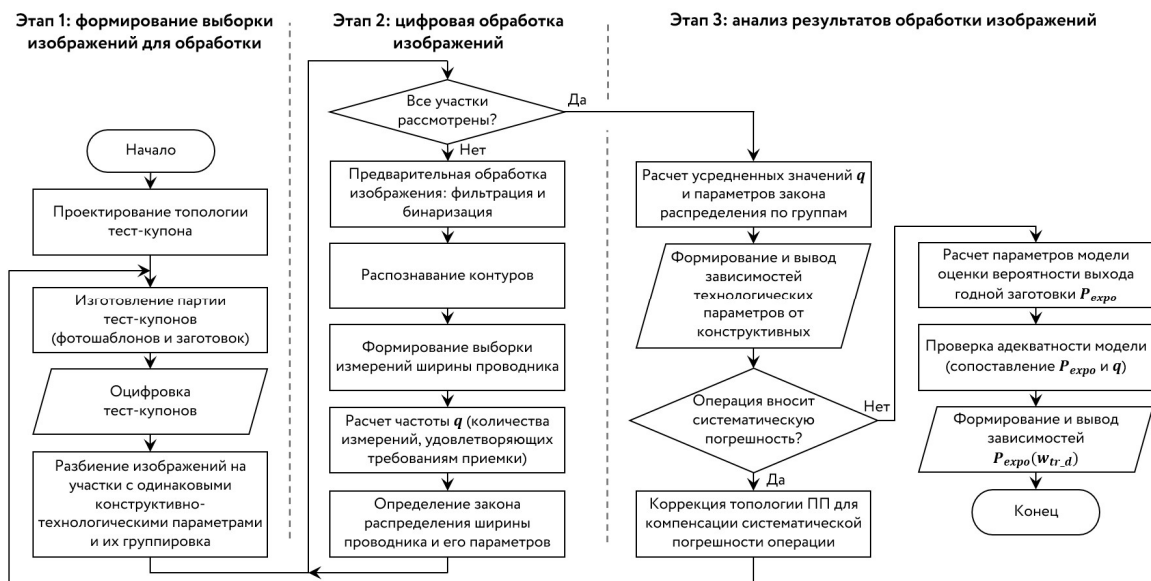


Рисунок 2 — Блок-схема методики экспериментального определения параметров операции фотолитографии

Методика включает в себя 3 основные этапа: изготовление и оцифровку тест-купонов, содержащих участки топологии с разной проектируемой шириной проводника; цифровую обработку изображений топологии, в ходе которой определены параметры ширины проводника как случайной величины; анализ результатов обработки изображений, на котором сформированы зависимости технологических параметров от конструктивных, определены возможности компенсации влияния технологических погрешностей на производимые изделия для увеличения вероятности выхода годных и построены функции вероятности выхода годной заготовки.

С помощью разработанного программного обеспечения произведена автоматическая сегментация изображения на отдельные участки, имеющие внутри себя одинаковые конструктивные параметры. Затем по каждому участку сформирована выборка ширин проводников и определено соответствие классу применения. По полученным выборкам определено подчинение случайной ширины проводника после операции нормальному закону распределения и определены его параметры. На последнем этапе для каждого из направлений печати с помощью метода наименьших квадратов (МНК) построена модель зависимости искажения от проектируемой ширины проводника δ_{expo} , как функция от проектируемой ширины проводника $w_{tr,d}$ ($\delta_{expo}(w_{tr,d})$, Рисунок 3а). Величина разброса ширины проводника $\sqrt{2}\xi$ для всех проведенных экспериментов составляет 18 мкм.

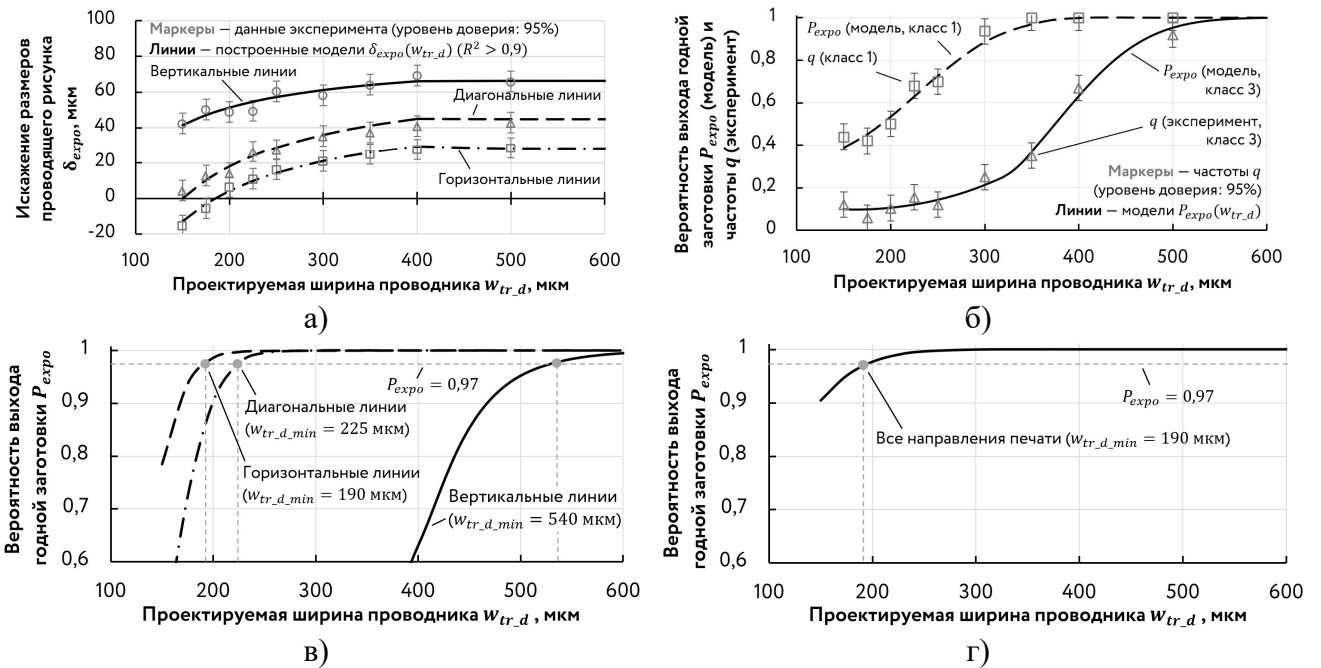


Рисунок 3 — Результаты экспериментального исследования фотолитографии: а) функции $\delta_{expo}(w_{tr,d})$ для разных направлений печати; б) сравнение результатов модели P_{expo} (2) и экспериментальных частот q (вертикальное направление печати); в), г) значения P_{expo} (класс применения 3) до компенсации искажения δ_{expo} и после, соответственно

На основе полученных параметров сформирована модель оценки вероятности выхода годной заготовки на операции фотолитографии (2): расхождение между результатами моделирования и экспериментальными данными, полученными с помощью компьютерной обработки, составляет не более 10 процентов (Рисунок 3б).

$$P_{expo} = \Phi\left(\frac{k_{max}w_{tr,d} - \delta_{expo}(w_{tr,d})}{\sqrt{2}\xi}\right) - \Phi\left(\frac{-k_{min}w_{tr,d} - \delta_{expo}(w_{tr,d})}{\sqrt{2}\xi}\right), \quad (2)$$

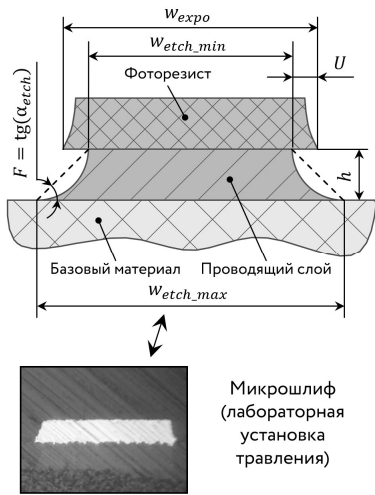
где: $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2} dt$ — функция Лапласа от параметра x .

Используя полученные модели $\delta_{expo}(w_{tr_d})$ для разных направлений печати (Рисунок 3а), произведена коррекция топологии, изготовлены соответствующие ей фотошаблоны и эксперимент проведен повторно. Результаты эксперимента показали, что с помощью коррекции топологии удалось уменьшить минимально воспроизводимую ширину проводника до 190 мкм, что соответствует предельным возможностям используемого фотоплоттера. Относительно вертикального направления печати удалось уменьшить величину проектных норм ширины проводника в 2,8 раза при сохранении требуемого уровня вероятности 0,97 (Рисунок 3в, г).

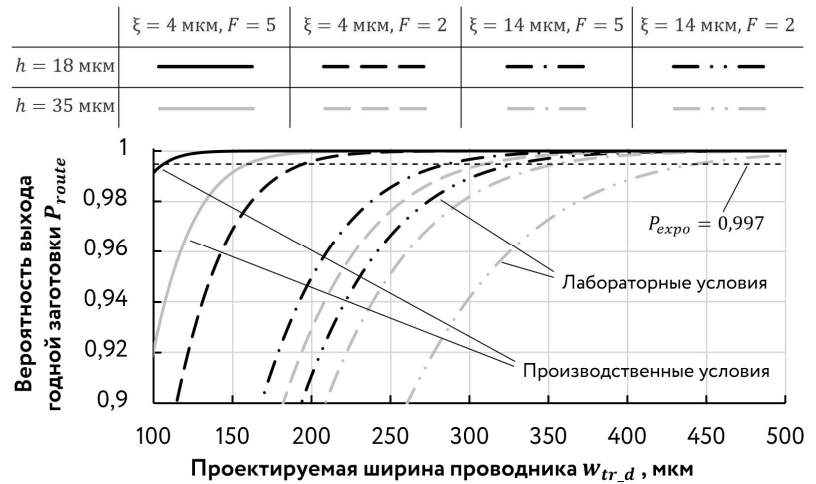
Далее для учета влияния процесса травления проведено расширение модели (2). В качестве контролируемого параметра заготовки использована максимальная ширина проводника в поперечном сечении после травления (Рисунок 4а). Для описания процесса выделены два технологических параметра: фактор травления F и подтравливание U . Затем, основе сформированного закона распределения максимального значения ширины проводника в поперечном сечении определена вероятность выхода годной заготовки P_{route} (3):

$$P_{route} = \Phi\left(\frac{k_{max}w_{tr_d} - \delta_{expo} - \delta_{etch}}{\sqrt{2(\xi^2 + \sigma_{etch}^2)}}\right) - \Phi\left(\frac{-k_{min}w_{tr_d} - \delta_{expo} - \delta_{etch}}{\sqrt{2(\xi^2 + \sigma_{etch}^2)}}\right), \quad (3)$$

где: $\delta_{etc} = 2(h/F - U)$, $\sigma_{etch} \sim h/F$ — систематическая и случайная составляющие погрешности на операции травления, соответственно; $F = 2h/(w_{etch_max} - w_{etch_min})$ — фактор травления; w_{etch_max} , w_{etch_min} — максимальная и минимальная ширины проводника в сечении после травления; h — толщина проводящего слоя; $U = (w_{expo} - w_{etch_min})/2$ — подтравливание; w_{expo} — ширина фоторезистивной маски.



а)



б)

Рисунок 4 — Вероятность выхода годной заготовки для процессов фотолитографии и травления: а) поперечное сечение проводника после травления, б) вероятность выхода годной заготовки P_{route} для разных технологических процессов

С помощью модели (3) построено семейство зависимостей (Рисунок 4б) вероятности выхода годной заготовки для процессов фотолитографии и травления в зависимости от проектируемой ширины проводника. В рассмотренном примере произведено варьирование: толщины медной фольги $h \in \{18; 35\}$ мкм, неровности воспроизведения края проводника $\xi \in \{4; 14\}$ мкм, фактора травления $F \in \{2; 5\}$ при фиксированных параметрах

$\delta_{expo} = \delta_{etch} = 0$ и требуемом классе применения изделия — 3. Худшие параметры операций $\xi = 14$ мкм и $F = 2$ соответствуют лабораторным условиям производства, а лучшие: $\xi = 4$ мкм и $F = 5$ — производственным. Таким образом, модель (3) позволяет априорно определить возможность изготовления проводящего рисунка с заданными конструктивными параметрами на производственных линиях с известными параметрами с помощью величины вероятности выхода заготовки, соответствующей требованиям приемки.

В третьей главе проведено исследование операции сверления, для которой основным требованием приемки является попадание отверстия внутрь контактной площадки (КП) для изготовления качественных межслойных переходов (Рисунок 5). Для устройств разных классов применения (i , принимает значения от 1 до 3) заданные в ГОСТ Р 55693–2013 требования приемки КП сквозного металлизированного отверстия на внешнем слое представлены в геометрическом виде областями допустимого смещения центра отверстия относительно КП Z_i (4):

$$R_{C3} = R_{via} - (R_{drill} + 50 \text{ мкм}), R_{C2} = \sqrt{R_{via}^2 - \frac{R_{drill}^2}{2}} - \frac{R_{drill}}{\sqrt{2}}, R_{C1} = \sqrt{R_{via}^2 - R_{drill}^2}, \quad (4)$$

где: $R_{C1} \dots R_{C3}$ и $D_{C1} \dots D_{C3}$ — радиусы и диаметры областей допустимого смещения центра отверстия относительно КП $Z_1 \dots Z_3$ (классы 1 и 2: допускается разрыв КП отверстием, если угол выходящей за пределы КП дуги отверстия менее 180° и 90° ; класс 3: гарантийный поясок не менее 50 мкм); R_{via} и D_{via} — радиус и диаметр КП, R_{drill} и D_{drill} — радиус и диаметр просверленного отверстия без учета слоя металлизации.

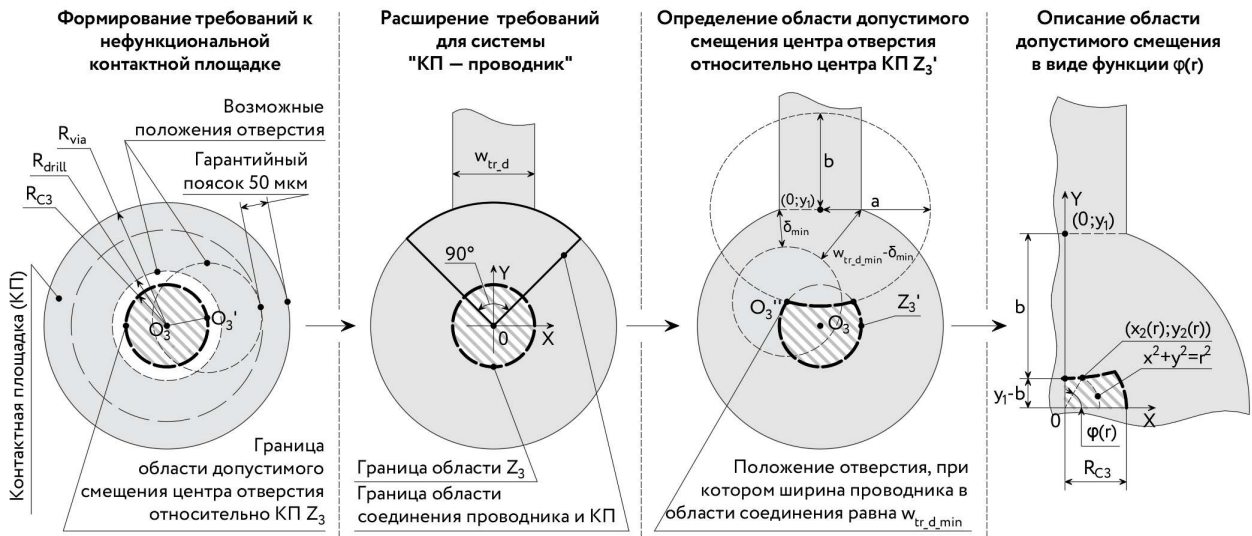


Рисунок 5 — Формирование требований выхода годной контактной площадки

Если в процессе сверления по ортогональным осям отсутствует систематическая составляющая погрешности позиционирования сверла и случайная составляющая одинакова и равна σ_{drill} , то случайная величина смещения центра отверстия относительно центра КП подчинена распределению Рэлея, и вероятность выхода годной нефункциональной КП (КП без подключенного проводника) P_{via_nf} — это вероятность попадания центра отверстия в область допустимого смещения Z_i , описываемая выражением (5):

$$P_{via_nf} = \frac{1}{2\pi\sigma_{drill}^2} \int_0^{R_{Ci}} \int_0^{2\pi} r \cdot e^{\frac{-r^2}{2\sigma_{drill}^2}} d\phi dr = 1 - e^{\frac{-R_{Ci}^2}{2\sigma_{drill}^2}}. \quad (5)$$

Далее произведено исследование влияния подключения проводника к КП на вероятность выхода годной КП путем введения дополнительного требования приемки на область соединения проводника и КП — ширина подключаемого проводника должна быть больше минимально допустимого значения $w_{tr_d_min}$ (определяется на основе ТТ к изделию). Представленное требование описано системой уравнений (6), решение которой — множество точек центра отверстия, в которых суммарное расстояние от его края до точек пересечения границ проводника и КП (x_1, y_1) и $(-x_1, y_1)$ равно $w_{tr_d_min}$.

$$\begin{cases} (x + x_1)^2 + (y - y_1)^2 = (w_{tr_d_min} - \delta + R_{drill})^2 \\ (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = (\delta + R_{drill})^2 \end{cases}, x_1 = \frac{w_{tr_d}}{2}, y_1 = \sqrt{R_{via}^2 - \frac{w_{tr_d}^2}{4}}, \quad (6)$$

где δ — варьируемый параметр: $\delta_{min} \leq \delta \leq w_{tr_d_min} - \delta_{min}$, δ_{min} — значение параметра δ , обеспечивающее решение системы (6) на окружности R_{Ci} .

Решением системы (6) является дуга эллипса с длинами полуосей a и b (7), которая уменьшает область допустимого смещения центра отверстия относительно КП (Рисунок 5, область Z_3' для изделий класса применения 3):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{(y-y_1)^2}{b^2} = 1, a = \frac{w_{tr_d_min}}{2} + R_{drill}, b = \frac{\sqrt{(2R_{drill} + w_{tr_d_min})^2 - w_{tr_d}^2}}{2}. \quad (7)$$

Для формирования новых пределов интегрирования при определении вероятности выхода годной КП с проводником произведено параметрическое описание границы области Z_i от радиус-вектора r (8) и в полярной системе координат функцией угла $\varphi(r)$ (9). Таким образом, модель вероятности выхода годной КП с подключенным проводником описывается выражением (10).

$$\begin{cases} y_2(r) = \frac{a^2 y_1 - b \sqrt{a^2(a^2 - b^2 + y_1^2) - r^2(a^2 - b^2)}}{a^2 - b^2} \\ x_2(r) = \sqrt{r^2 - y_2(r)^2} \end{cases} \cdot (8) \quad \varphi(r) = \begin{cases} \frac{\pi}{2}, r < y_1 - b \\ \arctg\left(\frac{y_2(r)}{x_2(r)}\right), y_1 - b \leq r \leq R_{Ci} \end{cases} \quad (9)$$

$$P_{via} = \frac{P_{via_nf}}{2} + \frac{1}{\pi \sigma_{drill}^2} \int_0^{R_{Ci}} \int_0^{\varphi(r)} r \cdot e^{\frac{-r^2}{2\sigma_{drill}^2}} d\varphi dr. \quad (10)$$

Использование модели (10) позволяет определить вероятность изготовления КП на имеющемся оборудовании или подобрать необходимое оборудование под имеющуюся топологию (Рисунок 6а, б).

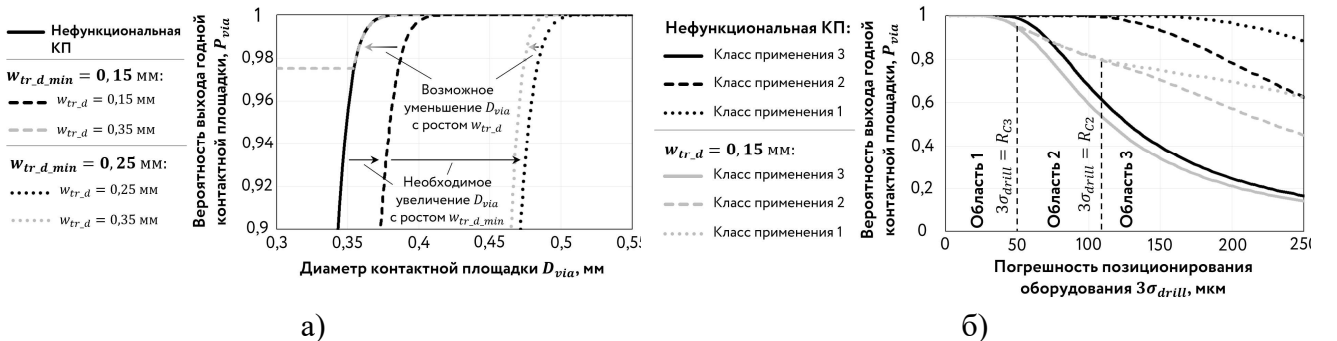
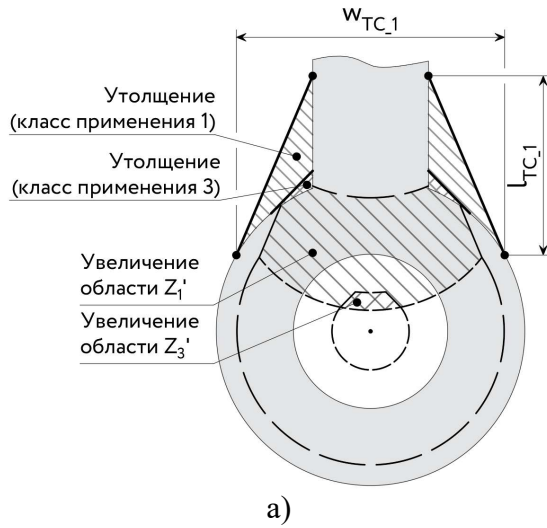


Рисунок 6 — Влияние конструктивно-технологических параметров на вероятность выхода годной КП P_{via} : а) зависимость P_{via} от диаметра КП D_{via} ; б) зависимость P_{via} от погрешности позиционирования оборудования $3\sigma_{drill}$

На основе модели (10) разработана методика определения геометрических параметров каплевидной КП (Рисунок 7в, КП с утолщением в области соединения проводника и КП для

случая с параметрами: $D_{via} = 0,4$ мм; $D_{drill} = 0,2$ мм; $w_{tr_d} = w_{tr_d_min} = 0,15$ мм), получаемых в результате минимизации занимаемой площади КП при условии, что вероятность ее выхода годной КП должна быть не меньше аналогичной нефункциональной КП.



Требуемая погрешность позиционирования $3\sigma_{drill}$ (мкм) для обеспечения $P_{via} = 0,997$ при $w_{tr_d_min} = 0,15$ мм			
Класс применения (ГОСТ Р 55693–2013)	3	2	1
Обычная КП	$w_{tr_d} = 0,15$ мм	30	30
	$w_{tr_d} = 0,20$ мм	33	33
	$w_{tr_d} = 0,25$ мм	37	37
Каплевидная КП (w_{tr_d} не влияет на результат)	45	102	152

а)

б)

Рисунок 7 — Результаты применения методики геометрических параметров каплевидной КП: а) сформированные каплевидные утолщения; б) требуемая погрешность позиционирования $3\sigma_{drill}$ (мкм) для обеспечения $P_{via} = 0,997$ при $w_{tr_d_min} = 0,15$ мм

Результатом применения методики являются формулы параметров утолщения (11), которые могут использоваться для установки параметров в системах проектирования, например, в Altium Designer.

$$l_{TCi} = \frac{R_{Ci} + b - R_{via} \sin[\varphi(R_{Ci})]}{D_{via}} \cdot 100\%, w_{TCi} = \cos[\varphi(R_{Ci})] \cdot 100\%, \quad (11)$$

где: l_{TCi} и w_{TCi} — длина и ширина каплевидного утолщения, выраженные в процентном отношении от диаметра КП D_{via} , для изделия i -го класса применения. В рассмотренных примерах использование каплевидных КП с параметрами, рассчитанными по разработанной методике, вместо обычных КП обеспечивает снижение требуемой точности оборудования для сверления от 1,5 до 5 раз в зависимости от класса применения и конструктивных параметров ПП (Рисунок 7г).

В четвертой главе произведено расширение модели (10) для оценки вероятности выхода годной заготовки на операциях совмещения элементов топологии: выделен общий характер влияния всех проводимых в ходе ТП изготовления ПП операций совмещения на качество выходного изделия, которое может быть выражено полем несовпадения координат элементов топологии на заготовке и эталоне по поверхности платы; сформирована обобщенная модель оценки вероятности выхода годной заготовки для процесса совмещения P_{pad} как совокупной вероятности попадания всеми отверстиями в соответствующие им КП (12), а также сформированы условия объединения моделей процессов сверления и совмещения.

$$P_{pad} = \prod_{k=1}^K \iint_{(z_{ik})} \frac{1}{2\pi\sigma_{xk}\sigma_{yk}\sqrt{1-\rho_k^2}} \cdot e^{\left(\frac{-1}{2(1-\rho_k^2)} \left[\frac{(x-m_{xk})^2}{\sigma_{xk}^2} - \frac{2\rho_k(x-m_{xk})(y-m_{yk})}{\sigma_{xk}\sigma_{yk}} + \frac{(y-m_{yk})^2}{\sigma_{yk}^2} \right]\right)} dx dy, \quad (12)$$

где K — количество совмещаемых КП на заготовке; m_{xk} , m_{yk} , σ_{xk} , σ_{yk} — математические ожидания и среднеквадратические отклонения ортогональных проекций по осям X и Y смещения центра k -ой КП относительно эталона; ρ_k — коэффициент корреляции между ортогональными

проекциями смещения центра k -ой КП относительно эталона; Z_{ik} , z_{ik} — область и граница области допустимого смещения центра отверстия относительно центра k -ой КП i -го класса применения.

Проведено экспериментальное исследование совмещения заготовки и шаблона топологии на операции фотолитографии. Разработана конструкция установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической (ЖК) матрицы и изготовлен опытный образец (Рисунок 8а, б).

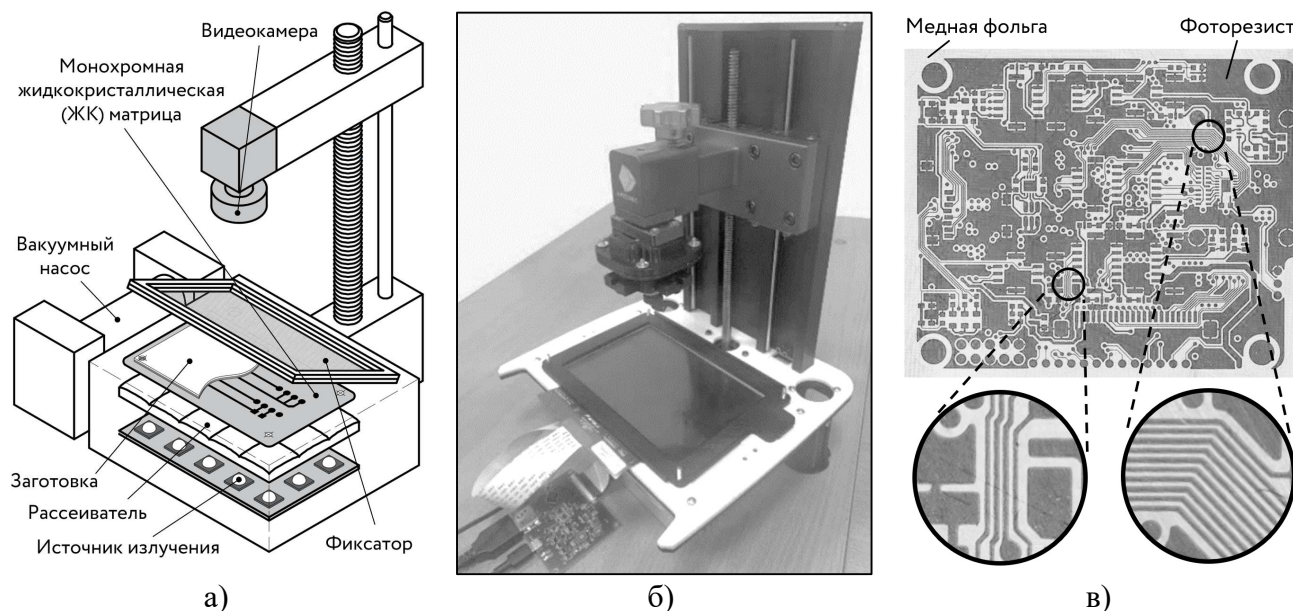


Рисунок 8 — Установка прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы: а) конструкция; б) собранный опытный образец; в) заготовка после фотолитографии (ширина дорожек и зазоров между дорожками на увеличенных участках 0,15 мм)

С помощью опытного образца установки подтверждена принципиальная работоспособность предложенной конструкции; определены технологические параметры операции экспонирования; сформированы алгоритмы и разработано соответствующее программное обеспечение для создания шаблонов из производственных файлов ПП и кодирования изображений шаблонов для вывода на ЖК-матрицу. Опытный образец обеспечивает возможность воспроизведения топологии 4-го класса точности по ГОСТ Р 53429-2009 с шириной проводников и зазоров 0,15 мм (Рисунок 8в).

Для автоматического совмещения изображения шаблона топологии и заготовки разработан алгоритм, который осуществляет коррекцию положения шаблона на основе информации о положении реперных знаков (переходных, монтажных и технологических отверстий), получаемой с помощью видеокамеры. Алгоритм (Рисунок 9а) подразумевает поиск реперных знаков на изображении шаблона, а также на серии изображений заготовки, полученных с помощью видеокамеры. Затем производится триангуляция изображений, формирующая на конечно-элементную (КЭ) сетку из треугольников, узлами которой являются центры реперных точек. По построенной сетке производится расчет локальных матриц аффинных преобразований, реализующих переход от системы координат шаблона к системе координат заготовки, для каждого треугольника (участка топологии), которые впоследствии применяются к изображению шаблона.

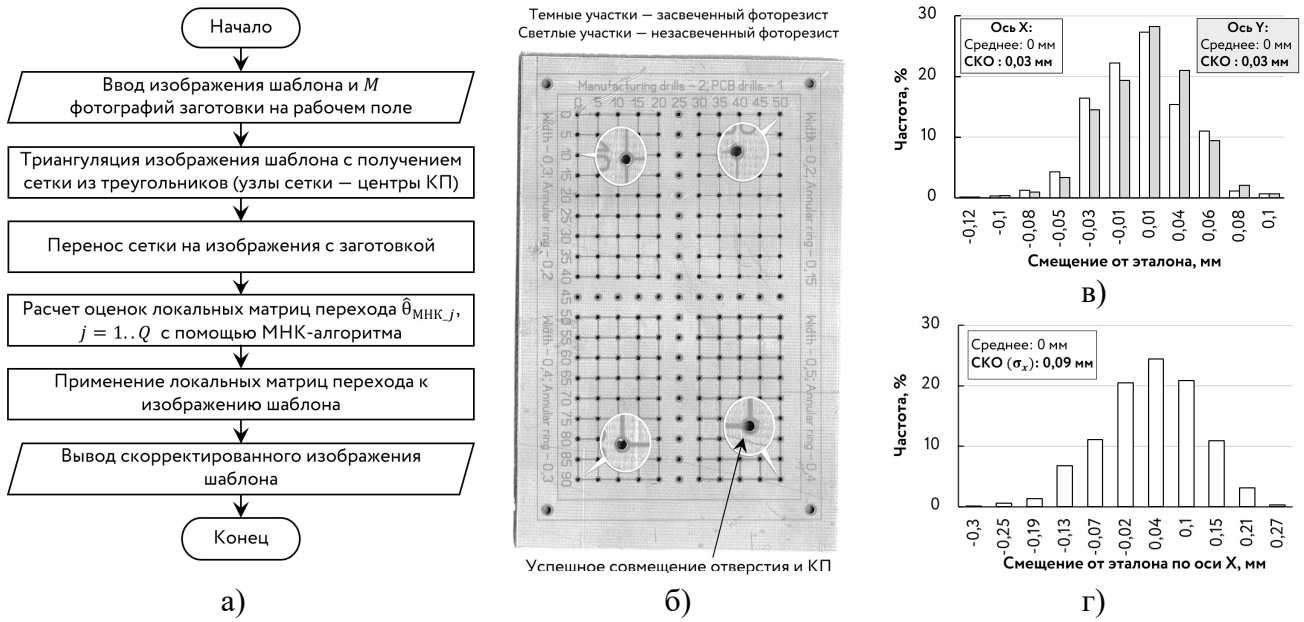


Рисунок 9 — Совмещение шаблона и заготовки: а) блок-схема алгоритма совмещения на основе КЭ сетки; б) результат совмещения заготовки и шаблона, полученный на опытного образце установки; экспериментальные гистограммы смещений реперных знаков относительно эталона для алгоритмов: в) на основе КЭ-сетки; г) общей матрицы аффинных преобразований

В результате проведенных экспериментов (Рисунок 9б) определено, что использование алгоритма совмещения на основе КЭ сетки позволяет уменьшить случайную составляющую погрешности операции совмещения, характеризующуюся среднеквадратическим отклонением (СКО), в 2 – 3 раза на разработанном опытном образце установки экспонирования (по сравнению с традиционно применяемым алгоритмом, основанном на использовании общей для всего шаблона матрицы аффинных преобразований). Полученные значения СКО смещения центра КП от эталонного положения при совмещении с помощью: КЭ-сетки — $\sigma_x = \sigma_y = 0,03$ мм (Рисунок 9в), общей матрицы аффинных преобразований — $\sigma_x = 0,09$ мм (Рисунок 9г), $\sigma_y = 0,07$ мм.

В пятой главе на основе разработанных частных моделей оценки вероятности выхода годной заготовки для отдельных технологических операций сформирована общая модель оценки вероятности выхода годной ПП P_{pcb} (13):

$$P_{pcb} = \prod_{n=1}^{N_{pcb}} \left\{ \left[\Phi \left(\frac{k_{max} w_{tr_dn} - \delta_{expo} - \delta_{etch}}{\sqrt{2(\xi^2 + \sigma_{etch}^2)}} \right) - \Phi \left(\frac{-k_{min} w_{tr_dn} - \delta_{expo} - \delta_{etch}}{\sqrt{2(\xi^2 + \sigma_{etch}^2)}} \right) \right] \cdot \prod_{k=1}^{K_n} \iint_{(z_{in,k})} \frac{1}{2\pi\sigma_{x_{n,k}}\sigma_{y_{n,k}}\sqrt{1-\rho_{n,k}^2}} \cdot e^{\left(\frac{-1}{2(1-\rho_{n,k}^2)} \left[\frac{(x-m_{x_{n,k}})^2}{\sigma_{x_{n,k}}^2} - \frac{2\rho_{n,k}(x-m_{x_{n,k}})(y-m_{y_{n,k}})}{\sigma_{x_{n,k}}\sigma_{y_{n,k}}} + \frac{(y-m_{y_{n,k}})^2}{\sigma_{y_{n,k}}^2} \right]} \right) dx dy} \right\}, \quad (13)$$

где: N_{pcb} — количество проводящих слоев ПП, $n = \overline{1, N_{pcb}}$ — индекс слоя ПП, K_n — количество КП на n -ом слое ПП, $k = \overline{1, K_n}$ — индекс КП на n -ом слое ПП. Модель (13) построена с учетом того, что события выхода годной заготовки слоя ПП независимы как для разных процессов (экспонирования и травления, а также совмещения и сверления), так и для разных проводящих слоев.

На основе модели (13) разработаны: метод оценки вероятности выхода годной ПП по ее конструктивно-технологическим параметрам (Рисунок 10), а также соответствующее ему программное обеспечение, позволяющее осуществить расчет в автоматическом режиме.

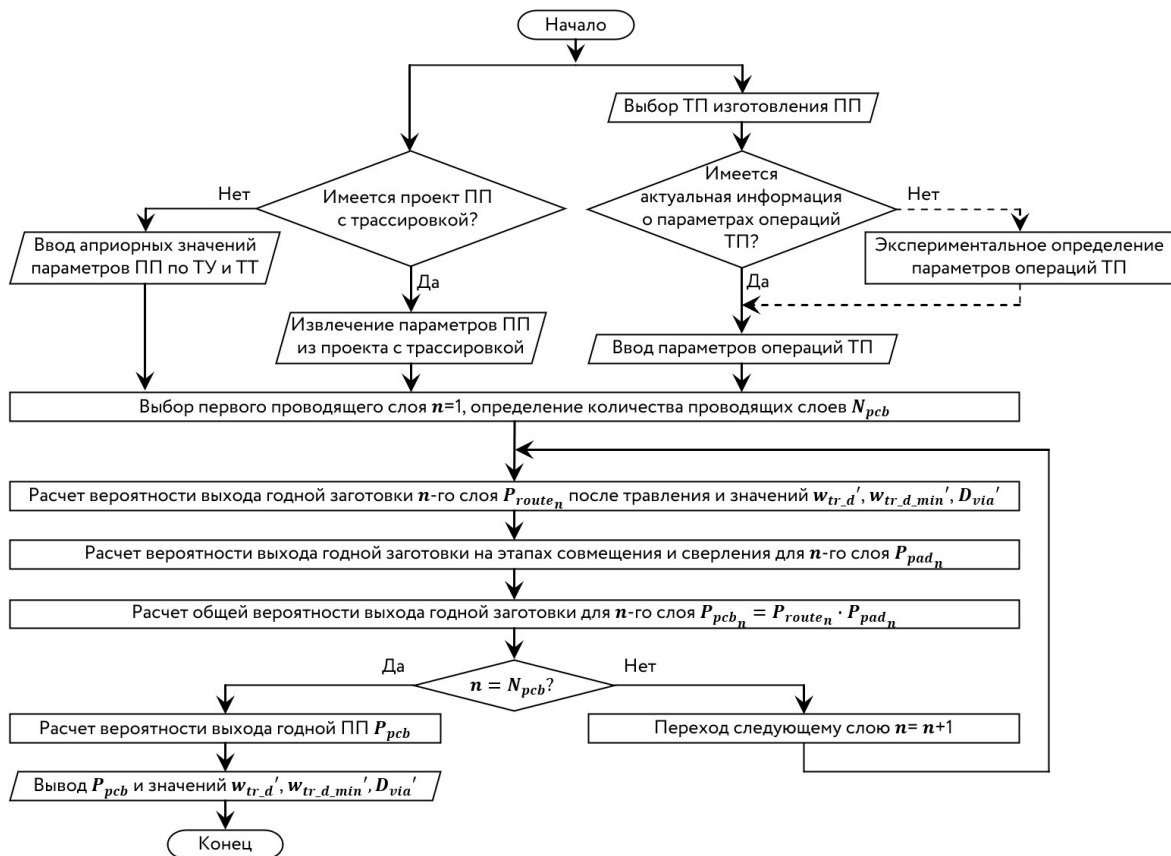


Рисунок 10 — Блок-схема метода оценки выхода годной ПП по ее конструктивно-технологическим параметрам

На рисунке 11б представлен пример результатов работы созданного программного обеспечения — априорно рассчитанные вероятности выхода годной ПП на лабораторной производственной линии в зависимости от требуемого класса применения для отдельных областей тестовой топологии разной сложности (Рисунок 11а, участки 1–4). Для проверки полученных результатов изготовлена опытная партия из 200 заготовок и для каждой определено ее соответствие требованиям приемки по ранее рассмотренным критериям. Расхождение между результатами моделирования и экспериментальными данными составляет не более 8 процентов.

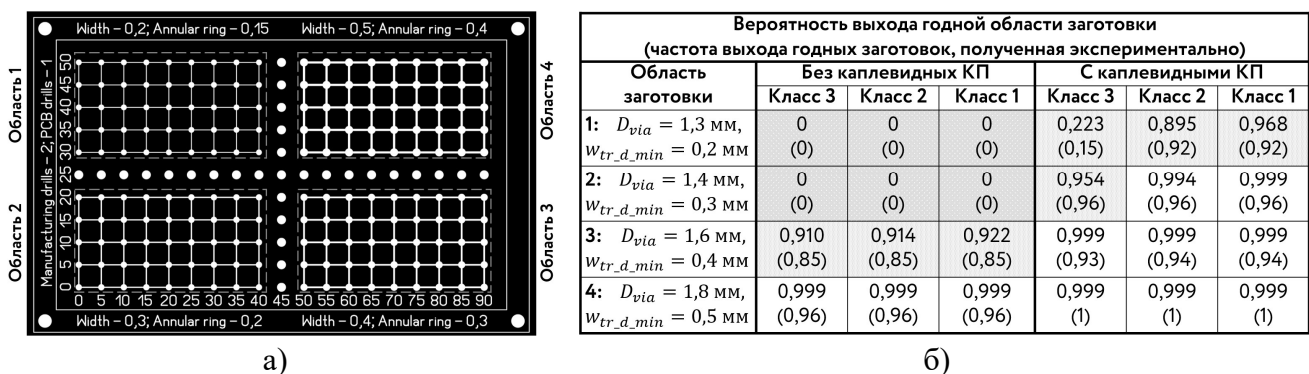


Рисунок 11 — Проверка метода оценки выхода годной ПП: а) тестовая топология; б) таблица рассчитанных вероятностей выхода годных областей тестовой топологии и экспериментально полученных частот выхода годных заготовок

Метод оценки выхода годной ПП позволяет решить прямую задачу — определить возможность изготовления ПП с заданными конструктивными параметрами на производственных линиях с известными параметрами с помощью величины вероятности выхода

ПП, соответствующей требованиям приемки. В практическом же смысле больший интерес представляет решение обратной задачи — поиск наборов конструктивно-технологических параметров, обеспечивающих вероятность выхода годной ПП, заданную в качестве исходного требования. Для решения сформулированной обратной задачи разработана методика определения конструктивно-технологических параметров ПП (Рисунок 12а).

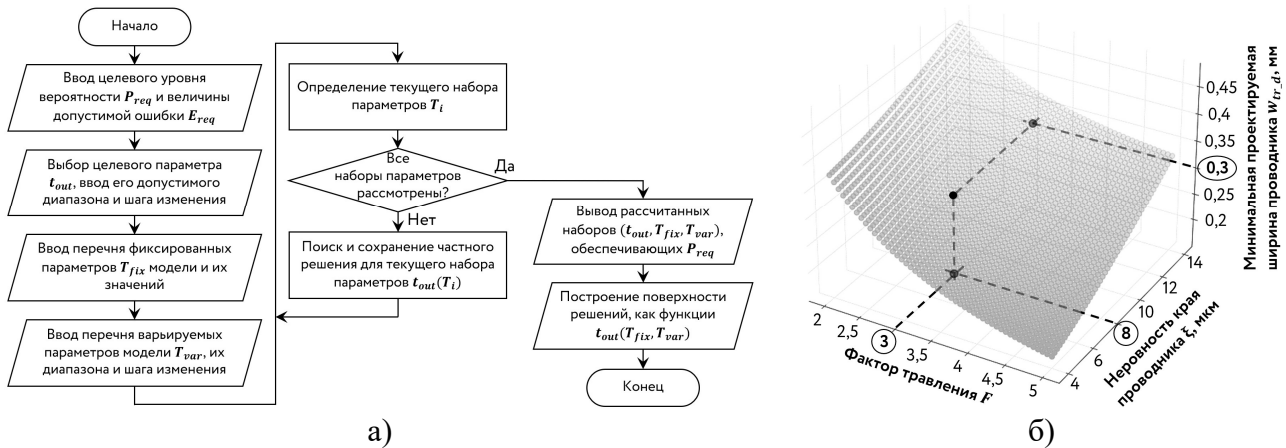


Рисунок 12 — Методика определения конструктивно-технологических параметров ПП:

а) блок-схема методики; б) результат применения методики для процессов фотолитографии и травления

Методика предполагает численное определение необходимого значения целевого параметра t_{out} из конструктивно-технологического множества для заданного набора фиксированных параметров T_{fix} и диапазонов варьируемых параметров T_{var} на сформированной расчетной сетке. Методика на входе принимает значения целевой вероятности P_{req} и допустимой ошибки определения вероятности E_{req} , диапазон поиска целевого параметра и шаг его изменения, значения фиксированных параметров, а также диапазоны и шаги изменения варьируемых параметров. Затем, решая оптимизационную задачу поиска минимума абсолютного значения ошибки вероятности, формируется набор частных решений, обеспечивающих заданную вероятность, на основе которых строится поверхность решений, которая определяет взаимосвязи между конструктивно-технологическими параметрами. На рисунке 12б представлен пример применения методики — поверхность из частных решений, каждое из которых обеспечивает вероятность выхода годной ПП $P_{req} = 0,997$ при $E_{req} = 0,0001$, позволяющая выбрать ширину проводника по технологическим параметрам процесса изготовления ПП. Например, для фактора травления $F = 3$ и неровности края $\xi = 8$ мкм ширина проводника должна быть не менее $w_{tr,d} = 0,3$ мм.

Проведено определение диаметра КП согласно разработанной методике, учитывая погрешности на операциях сверления переходных отверстий и совмещения шаблона и заготовки. На рисунке 13а представлены зависимости диаметра КП D_{via} от требуемой минимальной ширины проводника $w_{tr,d,min}$ ($D_{drill} = 0,2$ мм; $\sigma_{drill} = 0,01$ мм; класс применения 3), на основе которых можно судить, что применение каплевидных КП с параметрами, рассчитанными по формуле (11), позволяет существенно уменьшить их диаметр, в представленном примере — на 0,075 мм.

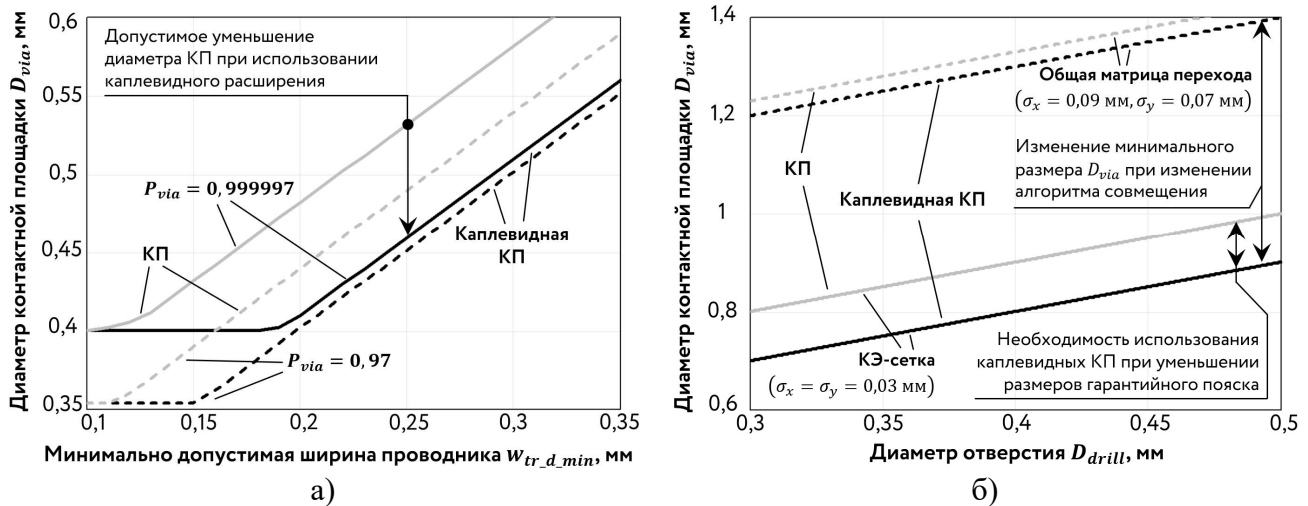


Рисунок 13 — Зависимости проектируемого диаметра КП от конструктивных параметров топологии ПП, учитывающие погрешности на отдельных технологических операциях:

а) сверления переходных отверстий; б) совмещения шаблона и заготовки

На рисунке 13б представлены зависимости проектируемого диаметра КП D_{via} от диаметра переходного отверстия D_{drill} ($P_{pad} = 0,997$, $w_{tr_d} = w_{tr_d_min} = 0,25$ мм), по которым можно сказать, что использование алгоритма совмещения на основе КЭ сетки на прототипе установки экспонирования позволяет уменьшить диаметр КП на 0,55 мм, и при уменьшении размеров гарантийного пояса увеличивается необходимость применения каплевидных КП при проектировании ПП — при применении алгоритма совмещения на основе КЭ-сетки, использование каплевидных КП позволяет еще на 0,1 мм уменьшить диаметр КП.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В работе проведены разработка и исследование нового метода априорной оценки качества печатных плат, опирающееся на анализ их конструктивных параметров, а также на характеристики операций технологического процесса их изготовления. В ходе исследования получены следующие **научные результаты**:

1) Исследовано влияние конструктивно-технологических параметров ПП на выход годных заготовок на отдельных технологических операциях изготовления ПП, которое позволило выделить основные параметры, влияющие на качество ПП, в соответствии с требованиями приемки по стандартам ГОСТ Р 55693-2013 и IPC-A-600G для каждой операции.

2) Разработаны и апробированы модели оценки вероятности выхода годной заготовки на исследуемых технологических операциях:

2.1) модель вероятности выхода заготовки, соответствующей требованиям приемки по критериям допустимой ширины проводника и зазора между проводниками, для операций фотолитографии и травления;

2.2) описывающие процесс сверления модели оценки вероятности выхода годной КП, для случаев нефункциональной КП и КП с подключенным проводником;

2.3) модель оценки вероятности выхода годной заготовки после операции совмещения, пригодная как для оценки качества совмещения заготовки и шаблона на этапе фотолитографии, так и совмещения слоев многослойной ПП.

3) Проведено объединение результатов исследований для отдельных технологических операций:

3.1) разработана математическая модель оценки вероятности выхода годной ПП с учетом критически значимых операций производства ПП: фотолитографии, травления, совмещения и сверления, отличие которой от известных заключается в совокупном учете влияния конструктивных параметров печатных плат и погрешностей технологических процессов их изготовления;

3.2) 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.

Проведено исследование возможностей практического применения составляющих метода оценки выхода годных ПП, в ходе которого разработаны:

- 1) Методика экспериментального определения параметров операции фотолитографии. Применение методики позволило подтвердить адекватность модели оценки вероятности выхода годной заготовки на этапе фотолитографии и минимизировать влияние процесса на изменение ширины проводника. Введение компенсации в проект ПП позволило уменьшить минимальную воспроизводимую ширину в 2,7 раза на лабораторной производственной линии.
- 2) Методика определения конструктивно-технологических параметров печатной платы, основанная на численном поиске наборов параметров, совокупно удовлетворяющих заданной целевой вероятности выхода годных.
- 3) Методика определения параметров каплевидной контактной площадки сквозного металлизированного отверстия, позволяющая 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).
- 4) Структурная схема, конструкция, архитектура программного обеспечения и опытный образец установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы. Опытный образец в автоматизированном режиме обеспечивает воспроизведение топологии 4 класса точности по ГОСТ Р 53429-2009.
- 5) Алгоритм совмещения заготовки и шаблона, основанный на применении конечно-элементной сетки. Реализация алгоритмов показала увеличение точности сеточного совмещения в 3 раза по сравнению с использованием общей матрицы перехода, что позволяет уменьшить диаметр контактной площадки на 0,55 мм.
- 6) Программное обеспечение, реализующее метод оценки выхода годных печатных плат и обеспечивающее автоматизированный расчет вероятности выхода печатной платы, соответствующей требованиям приемки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, включенных в Перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ:

1. Коробков М.А., Зайкин В.Д. Метод масочной компенсации неравномерности излучения в системе прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы // Труды МАИ – 2023. – №132, 12 – С. 1–30.

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. Doi:10.17586/0021-3454-2024-67-7-622-632.

3. 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. Doi: <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2025-28-1-17-34>.

4. Коробков М.А., Демидов А.С., Хомутская О.В. Метод совмещения шаблона и заготовки для установки прямого экспонирования печатных плат на основе жидкокристаллической матрицы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение — 2025. — Т. 68, № 4. — С. 342–354. Doi: 10.17586/0021-3454-2025-68-4-342-354.

В журналах, входящих в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science:

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 // Przegląd Elektrotechniczny – 2021. – Vol. 97, – №3 – Pp. 91–96. Doi:10.15199/48.2021.03.18.

6. Vasilyev F.V., Medvedev A.M., Barakovsky F.A., Korobkov M.A. Development of the Digital Site for Chemical Processes in the Manufacturing of Printed Circuit Boards // Inventions – 2021. – Vol. 6, – Issue 3, 48 – 19 p. Doi: <https://doi.org/10.3390/inventions6030048>.

7. 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 – 11 p. Doi: <https://doi.org/10.3390/mi13040634>.

8. 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. Doi: <https://doi.org/10.3390/inventions8030077>.

В материалах конференций, входящих в международную реферативную базу данных Scopus:

9. Khomutskaya O.V., Medvedev A.M., Korobkov M.A., Vancov S.V. The method of automated evaluation of the deformation of the printed circuit board // Proceedings of the 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia, 16–18 November 2021. Pp. 510–512. Doi: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657420.

В других изданиях:

10. Ванцов С.В., Васильев Ф.В., Хомутская О.В., Коробков М.А. Задачи управления технологическими процессами // Научное приборостроение – 2022. Т. 32, – №4 – С. 124–137. Doi: 10.18358/np-32-4-i124137.

11. Коробков М.А., Зайкин В.Д., Марейчев Е.С., Хомутская О.В., Васильев Ф.В. Система прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы // Научное приборостроение – 2023. Т. 33, – №1 – С. 65–85.

12. Коробков М.А. Моделирование процессов распределения тепла по печатной плате в условиях естественной и вынужденной конвекции // 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019». Тезисы, Москва, 18–22 ноября 2019, МАИ. – М: МАИ, 2019. – С. 93–94.

13. Коробков М.А. Analysis of English linguistic constructions in the description of the method for production of printed circuit boards with embedded components // Гагаринские чтения – 2020. Сборник тезисов докладов, Москва, 14–17 апреля 2020, МАИ. – М: МАИ, 2020. – С. 1540.
14. Исаев В.В., Коробков М.А. Влияние параметров проектирования и технологических процессов на вероятность появления дефектов на печатных платах // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». Тезисы 19 -й Международной конференции, Москва, 23–27 ноября 2020, МАИ. – М: Перо, 2020. – С. 265–267.
15. Коробков М.А. Исследование проблем создания цифрового производственного участка // XLVII Гагаринские чтения 2021. Сборник тезисов работ XLVII Международной молодежной научной конференции, Москва, 20–23 апреля 2021, МАИ. – М: Перо, 2021. – С. 311 – 312.
16. Коробков М.А., Васильев Ф.В. Применение искусственного интеллекта в управлении технологическими процессами // Авиация и космонавтика. Тезисы 20-й Международной конференции, Москва, 22–26 ноября 2021, МАИ. – М: Перо, 2021. – С. 233–234.
17. Коробков М.А. Исследование аспектов конструирования и изготовления печатных плат со встроенными компонентами // Гагаринские чтения – 2022. Сборник тезисов работ Международной молодежной научной конференции XLVIII, Москва, 12–15 апреля 2022, МАИ. – М: Перо, 2022. – С. 218–219.
18. Коробков М.А. Вероятностная модель изготовления бездефектной печатной платы в зависимости от параметров ее проектирования на этапе сверления отверстий // Авиация и космонавтика. Тезисы 21-й Международной конференции, Москва, 21–25 ноября 2022, МАИ. – М: Перо, 2022. – С. 229–230.
19. Коробков М.А., Зайкин В.Д., Маречев Е.С. Разработка системы прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы // Молодежь и будущее авиации и космонавтики. Сборник аннотаций конкурсных работ XIV Всероссийского межотраслевого молодежного конкурса научно-технических работ и проектов, Москва, 21–25 ноября 2022, МАИ. – М: Перо, 2022. – С. 79–81.
20. Коробков М.А. Формализация вероятностного метода конструкторско-технологической оценки надежности печатной платы // Гагаринские чтения – 2023. Сборник тезисов докладов XLIX Международной молодежной научной конференции, Москва, 11–14 апреля 2023, МАИ. – М: Перо, 2023. – С. 270.
21. Коробков М.А. Разработка метода оценки надежности печатных плат на основе анализа их конструктивно-технологических параметров // Авиация и космонавтика. Тезисы 22-й Международной конференции, Москва, 20–24 ноября 2023, МАИ. – М: Перо, 2023. – С. 147–148.
22. Коробков М.А., Зайкин В.Д., Демидов А.С., Хомутская О.В. Разработка оптической системы для установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы // XIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов, Москва, 24–26 января 2024, НИЯУ МИФИ. – М: НИЯУ МИФИ. С.581–582.
23. Барабанов В.С., Коробков М.А. Исследование адекватности конструкторско-технологической модели оценки надежности печатной платы // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции L Гагаринские чтения 2024, Москва, 09–12 апреля 2024, МАИ. – М: Перо, 2024. – С. 208.

24. Коробков М.А. Определение практических возможностей метода конструктивно-технологической оценки вероятности изготовления печатной платы // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции L Гагаринские чтения 2024, Москва, 09–12 апреля 2024, МАИ. – М: Перо, 2024. – С. 211.

25. Коробков М.А. Методика определения проектных норм печатной платы требуемого качества на основе параметров технологического процесса ее изготовления // Авиация и космонавтика. Тезисы 23-й Международной конференции, Москва, 18–22 ноября 2024, МАИ. – М: Перо, 2024. – С. 130.

26. Коробков М.А., Демидов А.С. Метод компенсации деформации печатных плат на операции экспонирования // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: Труды конференции XXXIII Междунар. науч.-техн. конф., 13–19 сентября 2024 г., Сочи, – М.: Изд-во «Артишок», 2024. – С. 141.

Публикации объектов интеллектуальной собственности:

27. Коробков М.А., Хомутская О.В., Поздняков К.Е. Программное обеспечение для анализа деформации слоя многослойной печатной платы // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021612973, дата регистрации: 26 февраля 2021 г.

28. Коробков М.А., Копылов Д.А., Хомутская О.В. Программное обеспечение для расчета и анализа величины деформации заготовок слоев многослойных печатных плат между этапами изготовления // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664424, дата регистрации: 04 июля 2023 г.

29. Степанов А.С., Лавриненко С.А., Коробков М.А. Программа для анализа деформаций слоев многослойных печатных плат // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025611043, дата регистрации: 16.01.2025.

30. Коробков М.А., Хомутская О.В., Зайкин В.Д. Установка прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы // Патент на изобретение № 2835108 от 21.02.2025.