

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
(МАИ)

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Васильев Федор Владимирович

Москва 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                         | 5  |
| Глава 1. АНАЛИЗ НАУЧНЫХ ОСНОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЫХОДА ГОДНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ОПЕРАЦИЙ ИХ ПРОИЗВОДСТВА ..... | 13 |
| 1.1 Элементы качества печатных плат.....                                                                                              | 13 |
| 1.2 Определение качества печатной платы с помощью методов оценки надежности.....                                                      | 18 |
| 1.3 Определение качества печатной платы с помощью методов статистического управления процессами .....                                 | 26 |
| 1.4 Концепция, использующая вероятность выхода годной печатной платы как количественный показатель ее качества.....                   | 30 |
| 1.5 Перечень исследуемых операций процесса изготовления печатных плат ...                                                             | 34 |
| 1.6 Выводы по главе.....                                                                                                              | 37 |
| Глава 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫХОДА ГОДНОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ФОТОЛИТОГРАФИИ И ТРАВЛЕНИЯ .....                  | 39 |
| 2.1 Процесс фотолитографии.....                                                                                                       | 39 |
| 2.1.1 Дефекты печатных плат, возникающие в процессе фотолитографии....                                                                | 39 |
| 2.1.2 Математическая модель процесса фотолитографии .....                                                                             | 42 |
| 2.1.3 Экспериментальное исследование процесса фотолитографии .....                                                                    | 46 |
| 2.2 Процесс травления .....                                                                                                           | 64 |
| 2.2.1 Параметры дефектов для процесса травления .....                                                                                 | 64 |
| 2.2.2 Влияние параметров процесса травления на качество печатной платы                                                                | 69 |
| 2.2.3 Модель оценки вероятности выхода годной заготовки для процессов фотолитографии и травления.....                                 | 71 |
| 2.3 Выводы по главе.....                                                                                                              | 75 |
| Глава 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫХОДА ГОДНОЙ КОНТАКТНОЙ ПЛОЩАДКИ ДЛЯ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ ...                  | 77 |

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1 Требования к контактными площадкам.....                                                                                                 | 77  |
| 3.2 Математическая модель оценки вероятности выхода годной нефункциональной контактной площадки .....                                       | 80  |
| 3.3 Математическая модель оценки вероятности выхода годной контактной площадки с подключенным проводником.....                              | 84  |
| 3.4 Вероятность выхода контактной площадки, соответствующей требованиям приемки, для процесса сверления .....                               | 91  |
| 3.5 Методика определения параметров каплевидной контактной площадки сквозного металлизированного отверстия .....                            | 95  |
| 3.6 Выводы по главе.....                                                                                                                    | 103 |
| Глава 4. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫХОДА ГОДНОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕНИЯ .....                                         | 106 |
| 4.1 Дефекты печатных плат, возникающие в процессах совмещения.....                                                                          | 106 |
| 4.2 Обобщенная модель оценки вероятности выхода годной заготовки для процесса совмещения.....                                               | 108 |
| 4.3 Программно-аппаратный комплекс экспонирования для экспериментального исследования операции совмещения .....                             | 114 |
| 4.3.1 Конструкция установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы.....                                              | 116 |
| 4.3.2 Режим работы установки экспонирования.....                                                                                            | 121 |
| 4.3.3 Методика масочной компенсации неравномерности излучения в системе прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы ..... | 126 |
| 4.3.4 Алгоритм генерации шаблона для отображения на жидкокристаллической матрице.....                                                       | 134 |
| 4.4 Методика совмещения шаблона и заготовки .....                                                                                           | 137 |
| 4.4.1 Алгоритм совмещения на основе общей матрицы перехода .....                                                                            | 138 |
| 4.4.2 Алгоритм совмещения на основе конечно-элементной сетки .....                                                                          | 145 |
| 4.4.3 Методика совмещения шаблона и заготовки для системы прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы.....                                  | 147 |
| 4.5 Вероятность выхода годной заготовки для процесса совмещения.....                                                                        | 152 |

|                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.6 Выводы по главе.....                                                                                                                                     | 157 |
| Глава 5. РАЗРАБОТКА ОБЩЕЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЫХОДА ГОДНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ПО ИХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ И ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДА НА ЕГО ОСНОВЕ ..... | 159 |
| 5.1 Модель оценки вероятности выхода годной печатной платы.....                                                                                              | 159 |
| 5.2 Метод оценки выхода годных печатных плат .....                                                                                                           | 161 |
| 5.3 Внедрение метода оценки выхода годной печатной платы.....                                                                                                | 164 |
| 5.4 Методика определения конструктивно-технологических параметров для печатной платы.....                                                                    | 170 |
| 5.5 Рекомендации по практическому применению составляющих метода оценки выхода годных печатных плат .....                                                    | 181 |
| 5.6 Выводы по главе.....                                                                                                                                     | 183 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                                             | 185 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....                                                                                                                | 188 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....                                                                                                                                       | 190 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты о внедрении на предприятия и использовании в учебном процессе результатов работы.....                                                      | 203 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельства о публикации объектов интеллектуальной собственности .....                                                                        | 207 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В Листинг программы компьютерной обработки изображений для определения параметров операции фотолитографии.....                                    | 211 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г Уравнение кривой, ограничивающей область допустимого смещения центра отверстия относительно центра контактной площадки .....                    | 222 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д Характеристики смещения координат реперных точек относительно эталона (совмещение с помощью общей матрицы перехода).....                        | 232 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е Листинг программного обеспечения, реализующего метод оценки вероятности выхода годных печатных плат.....                                        | 234 |



## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы и степень ее проработанности.** Приоритетной задачей развития отечественной электронной промышленности является создание конкурентноспособной продукции, сочетающей высокие технические характеристики и низкие производственные затраты. Для достижения этой цели требуется сокращение сроков разработки и изготовления электронных устройств при сохранении заданных параметров качества, включающих в себя обеспечение необходимых функциональных возможностей, массогабаритных характеристик и показателей надежности.

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 исследования** 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 выполнения 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.

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

**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 в 2,7 раза.
- Структурная схема, конструкция, архитектура программного обеспечения и собранный на их основе экспериментальный образец установки прямого экспонирования, использующий для переноса проводящего рисунка на заготовку жидкокристаллическую матрицу, которая обеспечивает автоматизированное проведение операции фотолитографии.
- 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 пояска площадки переходного отверстия в 2,3 раза на рассмотренных примерах.

**На защиту выносятся следующие положения:**

- 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 (Приложение А).

**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 [1–30], в том числе 4 в рецензируемых изданиях Перечня ВАК, [1–4], 4 в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных Scopus и Web of Science [5–8], 1 в материалах конференций, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus [9], 1 патент на изобретение [30] (Приложение Б, Рисунок Б.4) и 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ [27–29] (Приложение Б, Рисунки Б.1–Б.3).

**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 [23–25];
- исследовании способов оценки качества печатных плат и выделении конструктивно-технологических параметров, влияющих на него [2, 6–9, 12, 13, 15, 17, 27–29].

**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.



# **Глава 1. АНАЛИЗ НАУЧНЫХ ОСНОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЫХОДА ГОДНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ОПЕРАЦИЙ ИХ ПРОИЗВОДСТВА**

## **1.1 Элементы качества печатных плат**

Электроника является одной из самых молодых областей науки и техники. Но несмотря на свой возраст, она обладает высокой скоростью развития, так как открытия в большинстве областей физики, таких как электродинамика, оптика и т. д., влекут за собой существенные изменения в электронной области.

На основе требований к качеству электронных изделий (ЭИ), можно выделить общие направления развития электроники в целом [31–33]:

- 1) уменьшение размеров устройства (миниатюризация) — снижение веса и габаритов изделий для обеспечения удобства их использования, экономичного расходования материалов и, соответственно, снижения расходов на производство;
- 2) расширение функциональных возможностей, под которым подразумевается создание изделий с широким спектром возможностей и сценариев применения, но выполняющих свои функции на уровне специализированных инструментов; к этому направлению также можно отнести также и увеличение быстродействия устройств;
- 3) увеличение надежности, как свойства изделия сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [34];
- 4) повышение энергоэффективности, т. е. снижение затрат эквивалентных энергетических ресурсов при сохранении требуемой функциональности устройства;

5) обеспечение технологичности, как свойства, определяющего создание изделия, приспособленного к достижению оптимальных затрат при производстве, техническом обслуживании и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ [35].

Общее качество изделия возможно описать как совокупность его выделенных составляющих. В случае возможности их выражения в виде нормированных количественных величин, качество можно охарактеризовать площадью многоугольника на лепестковой диаграмме, каждый лепесток которой обозначает отдельную составляющую (Рисунок 1).

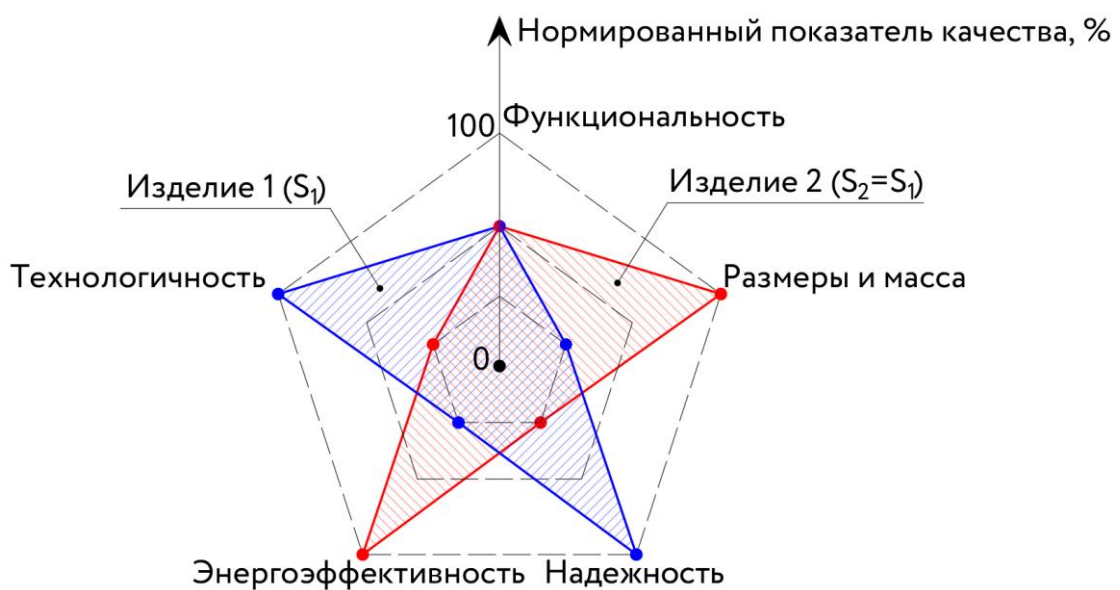


Рисунок 1 — Декомпозиция качества изделия на отдельные составляющие

Нетрудно заметить, что выделенные направления могут взаимно негативно влиять друг на друга. Например, увеличение надежности требует использования проверенных решений, которые имеют большие габариты и массу, а также неэнергоэффективны. Т. е. требуемый общий уровень качества и отдельных его свойств — характеристики, определяемые на начальных этапах жизненного цикла изделия. Так, на рисунке 1 представлены два изделия, имеющие одинаковое качество, выраженное в виде площади многоугольников  $S_1$  и  $S_2$  ( $S_1 = S_2$ ), но по-разному распределенное между его свойствами. Увеличение общего уровня качества, в свою очередь, возможно за счет увеличения количества привлекаемых к производственному процессу ресурсов и соответствующего увеличения затрат.

Таким образом, ключевым с точки зрения обеспечения экономической эффективности и конкурентоспособности разрабатываемой и изготавливаемой продукции является обеспечение уровня ее качества в определенном диапазоне. Данное суждение предполагает не только формирование нижней границы уровня допустимого качества, но и верхнюю границу, поскольку неограниченная максимизация функционала качества изделия требует соответствующего увеличения затрачиваемых ресурсов, что в конечном итоге нивелирует прибыль и делает производственный процесс убыточным.

Однако, одной величины требуемого уровня качества недостаточно — необходимо обеспечить ее соответствие результирующему качеству изготовленного изделия, которое может отличаться по причинам: неоптимальной организации производственного процесса, человеческого фактора, нестабильности цепочек поставок, изменений параметров изделия в процессе изготовления и т. д. Поэтому актуальной научной проблемой является создание обобщённого аппарата, позволяющего прогнозировать и оценивать выходное качество продукции на всех этапах жизненного цикла изделия.

Отдельно следует отметить необходимость оценки и прогнозирования результирующего качества ПП и монтажных подложек, как физической основой любого ЭИ. Растущие конструктивно-технологические требования к печатному монтажу особенно четко установились в области вычислительной техники. Увеличение быстродействия электронной компонентной базы (ЭКБ) находится в непосредственной зависимости от возможностей сокращения длины связей между логическими элементами (ЛЭ), так как эта длина оказывает прямое влияние на задержку передаваемого сигнала. Это достигается повышением степени интеграции ЛЭ, более плотной компоновкой микросхем на платах и увеличением плотности межсоединений [36, 37].

Плотность межсоединений и длина линий связи ПП напрямую связаны с технологическим процессом (ТП) ее изготовления, который определяет возможность реализации задуманной проектировщиком конструкции. К основным способам увеличения плотности межсоединений на ПП относятся:

- 1) уменьшение размеров ширины проводников и зазоров между проводниками [38];
- 2) уменьшение размеров контактных площадок (КП) сквозных металлизированных отверстий, используемых для создания трансверсальных соединений [39];
- 3) увеличение количества проводящих слоев [40];
- 4) использование несквозных металлизированных переходных отверстий: глухих, скрытых и микроотверстий, выполненных лазером или сверлением с контролем глубины [41, 42];
- 5) использование пространственных структур межсоединений, например, гибко-жесткой структуры ПП для стапелирования микросхем [43];
- 6) использование встроенных компонентов, реализуемых как с помощью толсто пленочной и тонко пленочной технологий [44], так и с помощью монтажа дискретных активных и пассивных компонентов внутрь основания [45].

Использование любого из перечисленных способов или их композиции предполагает в той или иной степени перестраивание этапов проектирования, разработки, технологической подготовки производства (ТПП) и изготовления ПП. Однако, на текущий момент априорная количественная оценка возможности внедрения (для производства) и эффективности применения (для проектирования) того или иного решения в контексте его влияния на выходное качество выпускаемой продукции затруднительна, т. е. отсутствует количественная характеристика качества, связывающая конструктивные параметры ПП и характеристики ТП ее изготовления.

Сейчас основным инструментом для определения соответствия проекта между ПП и ТП предприятия-изготовителя являются технологические возможности производства, предоставляемые в виде таблиц. Например, на рисунке 2 представлены фрагменты технологических возможностей производства ПП отечественного предприятия «Резонит» и зарубежного «JLCPCB».

| Минимальные значения                                    | Фольга, мкм | Базовый, мм | Продвинутый, мм (коэффициент 1.5) | Предельный, мм (стоимость по запросу) |
|---------------------------------------------------------|-------------|-------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Проводник                                               | 18          | 0,125       | 0,100                             | 0,075                                 |
|                                                         | 35          | 0,200       | 0,150                             | 0,150                                 |
|                                                         | 70          | 0,300       | 0,300                             | 0,300                                 |
|                                                         | 105         | 0,350       | 0,350                             | 0,350                                 |
| Зазор между проводниками                                | 18          | 0,125       | 0,100                             | 0,075                                 |
|                                                         | 35          | 0,200       | 0,150                             | 0,150                                 |
|                                                         | 70          | 0,300       | 0,300                             | 0,300                                 |
|                                                         | 105         | 0,350       | 0,350                             | 0,350                                 |
| Поясок монтажной контактной площадки (Annular ring PAD) | 18          | 0,200       | 0,150                             | 0,100                                 |
|                                                         | 35          | 0,250       | 0,200                             | 0,200                                 |

а)

| Features                            | Capability                     | Description                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Min. track width and spacing (1 oz) | 0.10 / 0.10 mm (4 / 4 mil)     | 1- and 2-layer: 0.10 / 0.10 mm (4 / 4 mil)<br>Multilayer: 0.09 / 0.09 mm (3.5 / 3.5 mil), 3 mil is acceptable in BGA fan-outs.                                                                                    |
| Min. track width and spacing (2 oz) | 0.16 / 0.16 mm (6.5 / 6.5 mil) | 2-layer: 0.16 / 0.16 mm (6.5 / 6.5 mil)<br>Multilayer: 0.16 / 0.20 mm (6.5 / 8 mil)                                                                                                                               |
| Track width tolerance               | ±20%                           | e.g. For a 0.1 mm track, the finished track width ranges from 0.08 and 0.12 mm.                                                                                                                                   |
| PTH annular ring                    | ≥0.20mm                        | 2-layer:<br>1 oz: Recommended 0.25 mm or above; absolute minimum 0.18 mm<br>2 oz: 0.254 mm or above<br><br>Multilayer:<br>1 oz: Recommended 0.20 mm or above; absolute minimum 0.15 mm<br>2 oz: 0.254 mm or above |

Требования к пояску контактной площадки сквозного отверстия с металлизацией:  
**Двусторонние** ПП (толщина фольги – 35 мкм): рекомендуется от 0,25 мм и выше, абсолютный минимум – 0,18 мм.  
**Многослойные** ПП (толщина фольги – 35 мкм): рекомендуется от 0,2 мм и выше, абсолютный минимум – 0,15 мм.

б)

Рисунок 2 — Представление технологических требований к конструкции ПП на предприятиях: а) «Резонит» (Россия) [46]; б) «JLCPCB» (Китай) [47]

Подобное представление технологических возможностей имеет ряд недостатков:

- 1) Отсутствие гибкой экономической модели расчета стоимости изготовления ПП ввиду дискретной сегментации плат по сложности изготовления с малым количеством классов (Рисунок 2а, представлено 3 класса: базовый, продвинутый и предельный). При этом, стоимость изготовления ПП предельной сложности с высокой плотностью соединений определяется технологом вручную на основе его экспертного опыта.
- 2) В случае вынужденного увеличения сложности проекта платы перед разработчиком формируются вопросы выбора конкретного способа или способов увеличения плотности межсоединений для минимизации влияния на общее качество проекта, например: «Что лучше: увеличить плотность трассировки ПП или увеличить количество слоев?» или (Рисунок 2б) «Насколько критично уменьшить поясок контактной площадки за пределы рекомендуемых значений, если производитель может его изготовить?» Также очевидно, что локальное увеличение плотности трассировки относительно проектирования ПП под предельные

технологические возможности целиком определяют разную сложность их изготовления, которая также не учитывается.

- 3) Сложность применения за счет большого количества разнородных параметров. Данный недостаток в значительной степени компенсируется тем, что предприятия-изготовители печатных плат формируют на основе своих технологических возможностей наборы правил для систем автоматизированного проектирования (САПР), контроль соблюдения которых осуществляется автоматически. Однако, тенденция к общей глобализации предоставляет возможность широкого выбора производителя для конкретного проекта ПП. В таком случае, текущее представление требований не позволяет при проектировании осуществить быстрый переход от одного предприятия к другому, что в конечном итоге определяет проблему выбора производства под проект ПП.

Таким образом, в результате проведенного анализа направлений развития электроники в целом и ПП в частности, определена необходимость в формировании количественной оценки качества проекта ПП, учитывающая ее конструктивные параметры, а также параметры ТП ее производства. В качестве предположительных научных основ для формирования такой оценки выделены методы оценки надежности, а также методы статистического управления процессами.

## **1.2 Определение качества печатной платы с помощью методов оценки надежности**

В настоящее время методы оценки надежности печатных плат, как элемента радиоэлектронной аппаратуры, можно разделить на два класса: вероятностно-статистические и физико-химические [48–50]. Статистические методы подразумевают определение закономерностей поведения объекта как совокупности составляющих его элементов, поведение которых можно представить в виде случайных событий. Тогда, в контексте оценки надежности,

объект имеет всего два состояния: исправное и неисправное. Эти состояния описываются функциями надежности, получаемыми статистическими методами.

Со стороны вероятностно-статистического метода надежность ПП может быть выражена значением интенсивности отказов при эксплуатации  $\lambda_э$  [51], которая определяется формулой (1):

$$\lambda_э = \lambda_б K_э [N_1 K_c + N_2 (K_c + 13)], \quad (1)$$

где:

- $\lambda_э$  — интенсивность отказов при эксплуатации;
- $\lambda_б$  — базовая интенсивность отказов в зависимости от технологии межсоединений;
- $K_э$  — коэффициент жесткости условий эксплуатации;
- $N_1$  — количество сквозных отверстий, пропаянных волной;
- $K_c$  — коэффициент сложности, зависящий от количества проводящих слоев в плате;
- $N_2$  — количество сквозных отверстий, пропаянных вручную.

Значения коэффициента сложности  $K_c$  рассчитываются по формуле (2):

$$K_c = 0,65m^{0,63}, \quad (2)$$

где  $m$  — количество проводящих слоев в плате. Для двусторонней ПП значение  $K_c$  составляет 1, для четырехслойной — 1,6; для шестислойной — 2; для восьмислойной — 2,4; для ПП с восемнадцатью слоями — 4.

Значения базовой интенсивности отказов в зависимости от технологии межсоединений  $\lambda_б$ :  $0,17 \cdot 10^{-10}$  [ч<sup>-1</sup>] — для печатного монтажа,  $10^{-10}$  [ч<sup>-1</sup>] для навесного монтажа. Значения коэффициента жесткости условий эксплуатации определены в ГОСТ РВ 20.39.304–98 и варьируются в диапазоне от 1 до 12.

При преимуществе простоты модели (1), ее применение для получения адекватных оценок надежности современной ПП затруднительно, поскольку в ней ПП рассматривается наравне с другими конструктивными и коммутирующими элементами схемы, и, по сути, в качестве конструктивных параметров используется только количество переходных отверстий и количество слоев, а ТП определяется

методом создания межсоединений. Модель не учитывает способ изготовления ПП, а также возможное изменение ее параметров в ходе ТП, которые в конечном итоге определяют надежность.

Также стоит отметить другие недостатки вероятностно-статистического подхода, которые определяют сомнения в возможности его использования для формирования критерия качества ПП:

- 1) По мере роста надежности элементов электроники определение показателей надежности через испытания становится неэффективным — с ростом надежности ЭКБ и ЭИ уменьшается их интенсивность отказов. Принимая во внимание, что на текущий момент базовая интенсивность отказов многослойной ПП определяется величиной  $0,17 \cdot 10^{-10} [\text{ч}^{-1}]$ , то подтверждение испытаниями таких показателей надежности потребует: длительного времени испытаний, за которое устройство перестанет быть экономически выгодным; увеличения количества исследуемой выборки, что также экономически нецелесообразно.
- 2) ПП, в отличие от дискретных электронных компонентов, могут значительно различаться в аспектах конструкции, которые также влияют на ее надежность, поэтому оценка предполагаемой надежности одной конструкции ПП на основе результатов статистических испытаний другой конструкции может сформировать ошибку в определении эксплуатационной интенсивности отказов на несколько порядков, что может сформировать ложное представление о надежности печатного узла (ПУ).
- 3) Информация, полученная в процессе испытаний, характеризует поведение объекта в условиях, близких к экстремальным, при физических воздействиях разной природы. Поведение объекта в реальных условиях эксплуатации может значительно отличаться. В данном контексте более адекватная оценка может быть получена при проведении тестовой эксплуатации изделий, однако такой подход также предполагает



существенные затраты и неприменим для оборудования ответственного назначения.

- 4) Для проведения долгосрочных испытаний надежность средств испытаний должна быть выше надежности испытуемой аппаратуры. с учетом того, что показатели надежности ЭКБ улучшаются в 10 раз каждые 10 лет [48], т. е. изготовленное ранее оборудование априорно менее надежно нового, то выполнение этого условия также затруднительно для высоконадежных устройств.
- 5) При статистическом подходе не учитываются изменение состояние испытуемого объекта в динамике, а также причины, приводящие к отказу устройств, т. е. имеет значение только конечный результат наблюдений.

Недостатки вероятностно-статистического подхода определяют необходимость развития физико-химического подхода, основанного на выявлении в объекте составляющих, снижающих общую надежность, и изучении процессов их деградации. Эти свойства и процессы описываются математическими моделями, отражающими физико-химические закономерности появления отказов элементов конструкции. Область, формирующая и изучающая закономерности такого рода, а также определяющая возможности их применения при проектировании систем — физика отказов [52, 53].

К моделям физики отказов относится уравнение Аррениуса [54], определяющего зависимость скорость реакции в зависимости температуры (3):

$$t_0 = A_0 e^{\frac{E_a}{kT}}, \quad (3)$$

где:

- $t_0$  — время наработки до отказа;
- $A_0$  — масштабный коэффициент;
- $E_a$  — энергия активации;
- $k$  — постоянная Больцмана;
- $T$  — температура исследуемого объекта.

Данное уравнение нашло широкое применение при разработке программ ускоренных испытаний изделий как эмпирическая зависимость для моделирования изменения коэффициентов диффузии, количества дефектов в кристаллической решетке, скорости ползучести, а также других процессов и реакций, зависящих от температуры (уравнения Эйри, Блэка и др. [55]).

Также к моделям физики отказов можно отнести:

- полуэмпирическую модель усталости паяных соединений Энгельмайера-Уайльда, основанную на общих моделях усталости металлов [56, 57];
- усталостную модель сквозных металлизированных отверстий [58, 59] и модель изламывающих напряжений на стыке металлизации переходного отверстия с внутренним кольцом контактной площадки [48];
- эмпирические модели, описывающие процессы деградации влагозащитных пленок, электрохимической миграции и роста анодных проводящих нитей [60, 61], и др.

С учетом высокого темпа развития информационных технологий (ИТ) и роста вычислительных мощностей стало возможным также получение оценок надежности изделий на основе имитационного моделирования, производимого в автоматизированных системах инженерного анализа (CAE). В системах такого рода возможно исследование влияния интересующих воздействий на цифровых моделях объектов испытаний с помощью численного решения дифференциальных уравнений физических процессов методом конечных элементов (МКЭ). Компьютерное моделирование существенно снижает время и стоимость как проведения исследований, направленных на выявление зависимостей между конструктивными параметрами изделия и изменением его свойств при приложении нагрузки, так и испытаний, направленных на подтверждение характеристик прочности и устойчивости для конкретных условий эксплуатации.

Например, в работе [7] проведено имитационное моделирование температуры пассивного компонента в зависимости от способа монтажа компонента: поверхностного и встроенного. В процессе моделирования

производилось варьирование положения ПП (горизонтальное и вертикальное), а также скорость потока воздуха для имитации условий естественной и вынужденной конвекции (Рисунок 3).

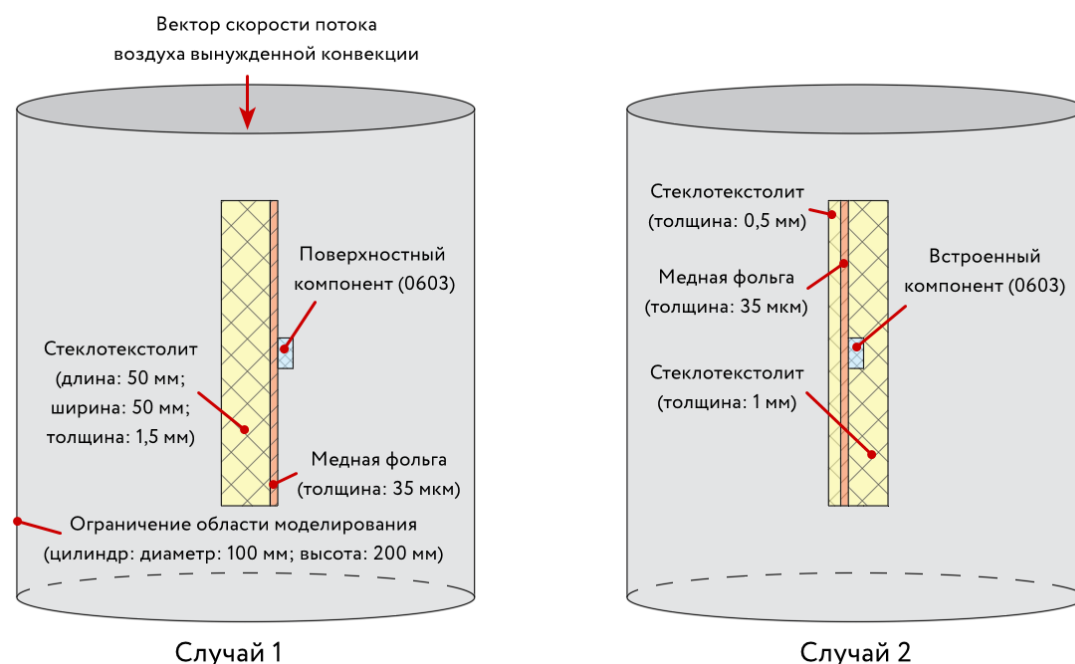


Рисунок 3 — Геометрические модели для исследования влияния метода монтажа на температуру компонента: случай 1 — поверхностный монтаж; случай 2 — встроенный монтаж

На рисунках 4а, б представлены карты распределения температур по проводящему слою для разных способов монтажа компонента при охлаждении естественной конвекцией (скорость потока воздуха равна нулю): в качестве температуры компонента использовано максимальное значение температуры на карте. Затем моделирование проведено повторно, варьируя скорость потока воздуха в диапазоне от 0 до 32 м/с (Рисунок 4в), тем самым моделируя поведение системы при вынужденной конвекции. Полученные результаты позволяют определить более низкую температуру встроенного компонента при значениях скорости потока воздуха до 16 м/с. На практике значения для систем охлаждения электроники не превышают 15 м/с, что определяет преимущество встроенного монтажа с точки зрения обеспечения температурного режима изделия. Таким образом, компьютерное исследование позволило определить влияние конструктивных параметров ПУ на его надежность, в качестве показателя которой используется температура компонента.

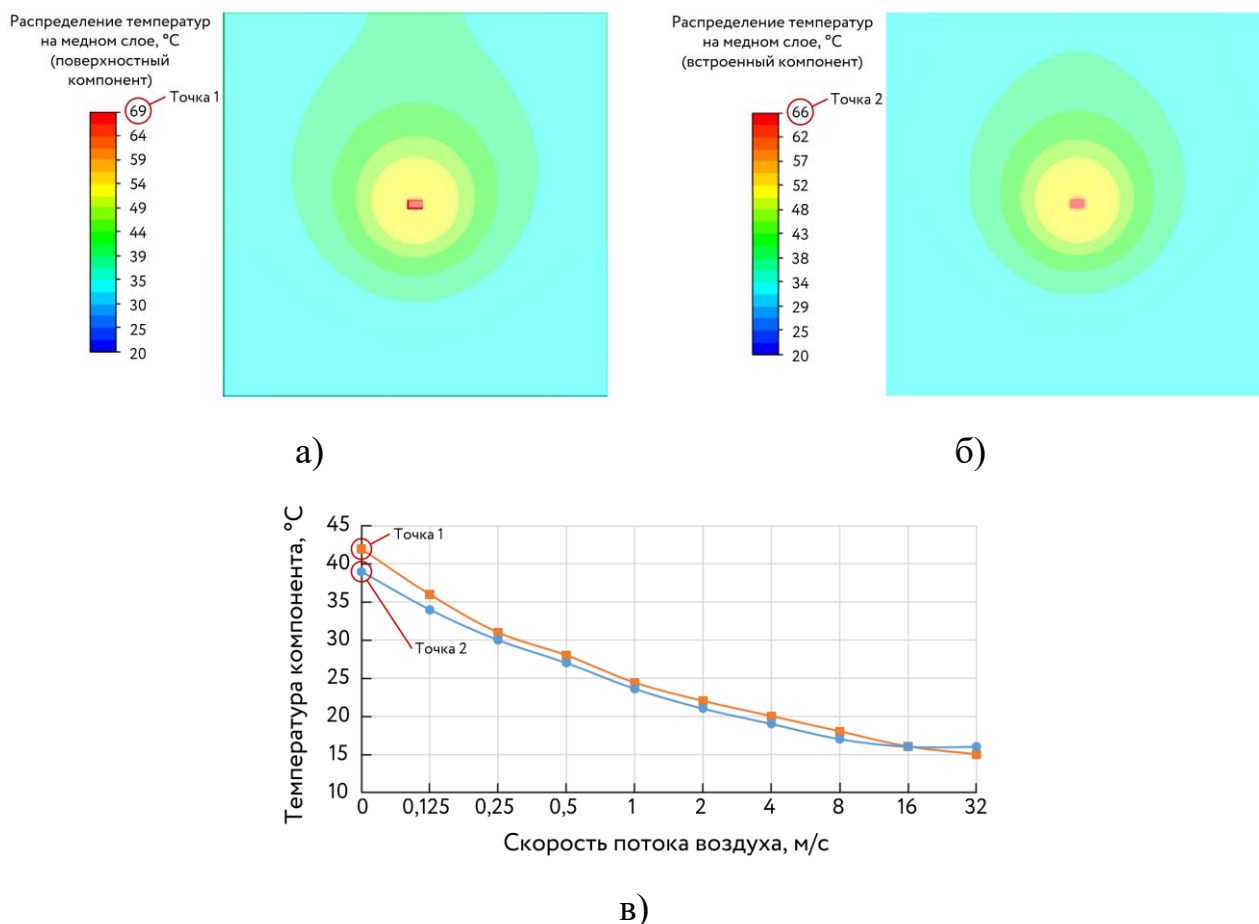


Рисунок 4 — Результаты исследования влияния метода монтажа на температуру компонента: а), б) карты распределения температуры по поверхности медного полигона в случае охлаждения естественной конвекцией для поверхностного и встроенного монтажа соответственно; в) зависимость температуры компонента от скорости потока воздуха (синяя линия — встроенный компонент, оранжевая — поверхностный компонент)

Однако, построение подобных имитационных моделей в настоящее время требует высокой квалификации инженера, осуществляющего моделирование. Для получения адекватных результатов моделирования необходимо:

- точное определение начальных (НУ) и граничных условий (ГУ) протекания анализируемых физических и химических процессов;
- оценка качества построения конечно-элементной (КЭ) сетки на твердотельной модели объекта испытаний;
- корректный выбор моделей физических процессов и алгоритмов численных расчетов с учетом особенностей их применения и принятых допущений.

Также в большинстве случаев желательна экспериментальная апробация имитационной модели с помощью аналогичного или упрощенного натурного эксперимента, который позволит подтвердить адекватность модели с некоторой степенью достоверности и определить возможность ее применения для формирования каких-либо выводов и заключений.

Повсеместное внедрение САЕ-систем в производственные процессы — один из необходимых этапов, обеспечивающих переход к передовым цифровым и интеллектуальным производственным технологиям, а также новым способам конструирования. Их использование определяет необходимость формирования обобщенной цифровой модели изделия, соответствие свойств реальному объекту которой должно поддерживаться во время всего жизненного цикла изделия (ЖЦИ), обеспечивая единство понимания продукта за счет формирования взаимосвязей между производственными этапами. Некоторые составляющие этой концепции уже сложились в зарубежной практике [54] и носят название «Design for Excellence» (DfX), которая определяет обеспечение производственным процессом той или иной характеристики качества, например:

- обеспечение технологичности устройства с точки зрения его изготовления — Design for Manufacturability (DfM);
- обеспечение технологичности процессов технологичности устройства с точки зрения процессов его сборки и ремонтпригодности — Design for Assembly (DfA);
- обеспечение возможности тестирования и контроля качества изделия — Design for Inspection (DfI) и Design for Testability (DfT);
- обеспечение надежности изделия — Design for Reliability (DfR) и др.

Потенциал концепции DfX и ее составляющих с точки зрения повышения эффективности производства раскрыт лишь на малую часть. Для полного ее раскрытия необходимо формирование общей методологии, подразумевающей реструктуризацию современных производственных процессов на основе применения ИТ, как инструмента быстрого обмена информацией и автоматизации рутинных операций, а также как основы для построения цифровых моделей

изделий, учитывающих их взаимосвязи с окружающим миром в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации.

Однако, на текущий момент использование физико-химических моделей оценки надежности для описания общего качества изделия в процессе его производства не представляется возможным. В первую очередь, это связано со сложным характером протекания и, соответственно, описания процессов, а также большим количеством факторов, определяющих результат. Данное суждение особо верно для химических процессов производства ПП, для которых затруднительно установить связи «управляющее воздействие — результат». Также, сложность математических моделей, обусловленная большим количеством допущений при их построении и эмпирически определяемыми коэффициентами отдельных процессов отказов, не позволяет осуществить их интеграцию в единый комплекс. Поэтому использование физико-химических моделей оценки надежности целесообразно использовать для формирования правил проектирования ПУ, т. е. технических требований (ТУ) к изделию, которые необходимо обеспечить.

Таким образом, самостоятельное использование методов оценки надежности для формирования количественного критерия оценки качества ПП нецелесообразно, поскольку:

- вероятностно-статистические методы не учитывают влияние конкретного технологического процесса и особенностей самой конструкции качество ПП;
- физико-химические методы рассматривают частные проблемы обеспечения надежности, а построение математических моделей для процессов, протекающих при изготовлении ПП, затруднительно в силу их сложности и большого количества влияющих параметров.

### **1.3 Определение качества печатной платы с помощью методов статистического управления процессами**

Статистическое управление процессами (Statistical Process Control, SPC) является способом применения статистических методов, а также статистических

или стохастических алгоритмов контроля производственного процесса для достижения хотя бы одной из следующих целей [62, 63]:

- 1) увеличения знаний о процессе;
- 2) регулирования процесса для достижения желаемого поведения процесса;
- 3) уменьшения отклонений параметров готовой продукции или достижения других улучшений работы процесса.

SPC — это один из методов, нацеленных на снижение вариаций в процессах изготовления для обеспечения стабильного качества изготовления продукции и, соответственно, минимизации потерь. SPC получило широкое распространение как часть системы менеджмента качества и описано как в общих рекомендациях по стандартизации Р 50.1.087–2013 [64] и Р 50.1.097–2014 [65], так и в составе отдельных стандартов, например ГОСТ Р 51814.3–2001 [66]. Основным инструментом SPC является контрольная карта, отражающая изменение во времени контролируемой характеристики изделия, тем самым отражая качество процесса. В зависимости от цели применения контрольной карты существуют два подхода к ее построению:

- 1) контроль выполнения требований к изделию в виде установленных границ поля допуска;
- 2) определение контрольных границ на основе анализа функционирования процесса — в этом случае границы охватывают область вокруг среднего значения контролируемой характеристики.

На рисунке 5 показан пример контрольной карты с участками выхода процесса из устойчивого состояния, определяющими необходимость корректировки процесса [64]:

- появление семи последовательных точек ниже или выше центральной линии процесса  $CL$  (Рисунок 5, 1 и 2);
- появление семи последовательных точек с тенденцией изменения характеристики вверх или вниз (Рисунок 5, 3);
- появление точки за пределами диапазона, ограниченного верхней ( $UCL$ ) и нижней ( $LCL$ ) контролируемыми границами (Рисунок 5, 4);

— появление очевидных неслучайных изменений процесса, выявленных на основе априорной информации об используемом оборудовании, ТП или физическом законе, описывающем процесс.

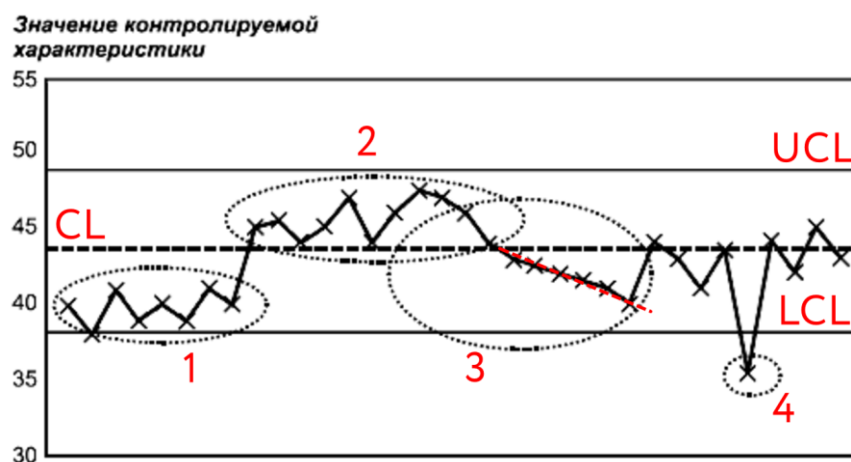


Рисунок 5 — Контрольная карта управления процессом с критериями его выхода из устойчивого состояния по Р 50.1.087–2013 [64]

Наиболее важными параметрами с точки зрения SPC являются параметры смещения, сходимости и воспроизводимости. Смещение характеризует разницу между эталонным значением и средним измеренным значением. Сходимость можно определить как дисперсию в измерениях, полученных одним инструментом, одним оператором в нескольких последовательных измерениях на одном и том же изделии. Обычно к ней относятся как к дисперсии измерительной системы. В свою очередь, воспроизводимость — дисперсия в средних значениях измерений одного изделия, сделанных различными операторами с помощью одной измерительной системы. Обычно к ней относятся как к дисперсии оператора.

Последние два параметра образуют интегральную характеристику сходимости и воспроизводимости измерительной системы (Gage Repeatability and Reproducibility, *GRR*), которую можно выразить как сумму дисперсий последних величин. Смещение и *GRR* можно увидеть, построив гистограмму по проведенным измерениям или аппроксимирующую функцию плотности вероятности (Рисунок 6), на примере которых также возможна оценка влияния каждого параметра по отдельности на получение изделия с величиной контролируемой характеристики в установленных полях допуска.



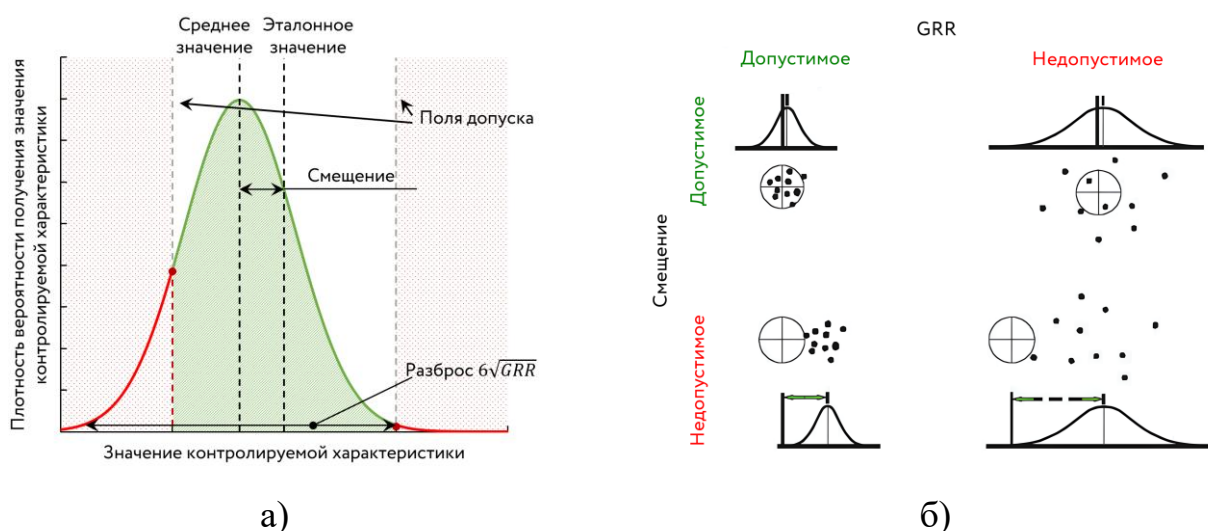


Рисунок 6 — Параметры статистического управления процессами:  
 а) представление параметров смещения и  $GRR$ ; б) влияние параметров на получение годного изделия (окружностями на рисунке показана граница поля допуска)

Таким образом, для дальнейшего формирования количественной оценки качества ПП в качестве методологической базы выбраны методы SPC, поскольку:

- общность описания методов не ограничивает их область применения конкретной производственной областью, что позволяет формировать однотипные модели как для разных технологических процессов изготовления печатных плат, так и разных изделий в целом;
- используемый методами математический аппарат, основанный на применении элементов теории вероятностей и математической статистики, подразумевает возможность представления моделей на разных уровнях абстракции, т. е. позволяет использовать информацию о влиянии как отдельных параметров ТО на получаемый результат (в том числе и на основе физико-химических моделей оценки надежности), так и, в случае их отсутствия, использовать интегральные характеристики их точности [67];
- методы SPC позволяют определить прямое влияние параметров процесса на качество продукта, выраженное в обеспечении возможности попадания значения измеренной контролируемой характеристики изделия в заданное поле допуска;

— самостоятельное определение контролируемых характеристик изделия позволяет сформировать отдельные модели для разных ТО, обеспечивая возможность композиции по модульному принципу, что обеспечивает возможность исключить из рассмотрения те характеристики, которые не влияют на качество конкретного изделия.

#### 1.4 Концепция, использующая вероятность выхода годной печатной платы как количественный показатель ее качества

На основе методов SPC предложена концепция, в которой априорной количественной оценкой качества ПП является вероятность ее изготовления в соответствии с предъявляемыми к ней требованиями. На рисунке 7 представлены контекстные диаграммы верхнего уровня, описывающие применение концепции как к одной ТО, так и к ТП изготовления ПП в целом.

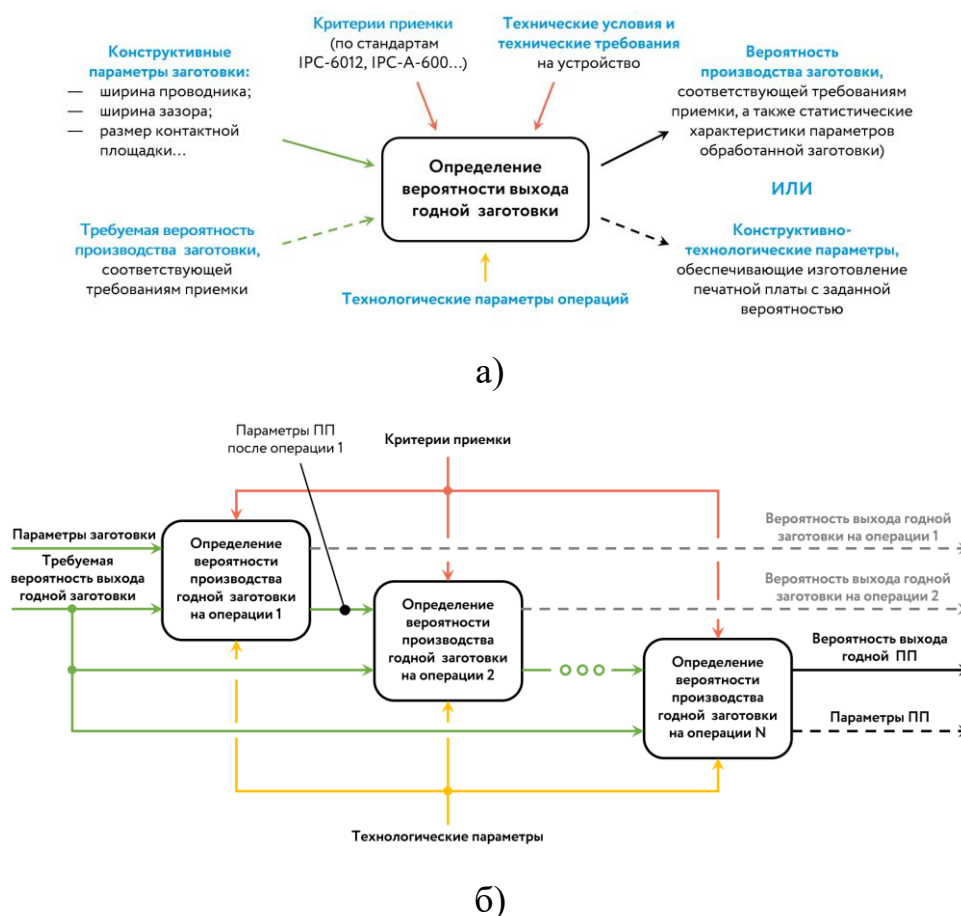


Рисунок 7 — Контекстные диаграммы концепции определения вероятности выхода годной заготовки ПП: а) для ТО; б) для ТП

В случае рассмотрения одной ТО можно выделить следующие основные информационные потоки:

- Вход — информация о конструктивных параметрах заготовки, определяемых на этапах проектирования и разработки электронного устройства. В зависимости от рассматриваемой ТО к таким параметрам могут относиться: ширина проводников и зазоров между проводниками, размер КП, диаметр переходного отверстия, толщина проводящего слоя или толщина слоя металлизации и т. д. Также составляющей входного потока является требуемая вероятность выхода годной заготовки, которая, по существу, определяет требования конструктивному или технологическому запасу, который необходимо обеспечить для изделия.
- Механизм — информация о характеристиках ТО, используемой для обработки заготовки. В данном случае механизм описывает стохастическое изменение заданных конструктивных параметров заготовки в ходе ее обработки.
- Управление — требования к качеству заготовки, выраженные в виде допустимых диапазонов значений контролируемых характеристик. Их формирование возможно на основе ТУ и технических требований (ТТ) (например, требований к площади поперечного сечения проводника для обеспечения необходимой токонесущей способности [68] или ширине проводника для обеспечения необходимой погонной емкости для высокоскоростных линий передачи данных [69]). Также альтернативным источником могут являться требования стандартов приемки печатных плат, например: IPC-A-600G [70], IPC-6012B [71], ГОСТ Р 53429-2009 [72], ГОСТ Р 55693-2013 [73] и др.
- Выход — вероятность выхода заготовки, у которой после обработки на ТО с известными характеристиками выбранные контролируемые параметры находятся в требуемых пределах. Еще одним результатом расчета вероятности являются статистические характеристики параметров обработанной заготовки, которые служат исходными данными для

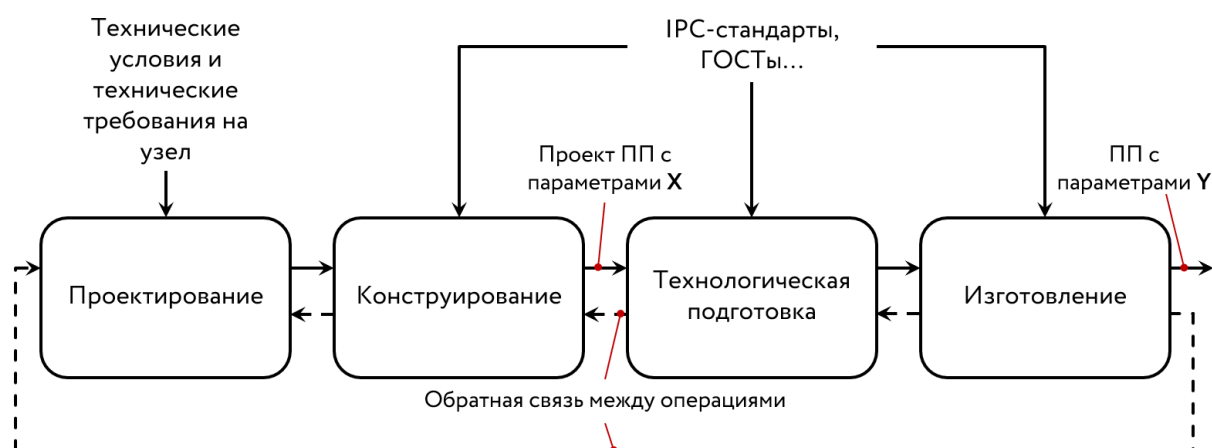
исследования следующей ТО. Альтернативным выходом является результат решения обратной задачи, который имеет более широкое практическое применение, а именно — набор конструктивно-технологических параметров, обеспечивающих требуемую вероятность выхода заготовки, соответствующей требованиям приемки.

В случае обобщения концепции, ТП производства ПП может быть представлен как последовательность ТО, каждая из которых вносит свои изменения в набор контролируемых параметров. Результатом применения концепции для всего ТП является либо вероятность выхода годной ПП, либо набор конструктивно-технологических параметров ПП, обеспечивающих заданные требования к приемке. Тогда, на основе информации о влиянии ТО на изменение проектных значений конструктивных параметров возможно внесение априорных корректировок в проект ПП для повышения величины вероятности годных изделий.

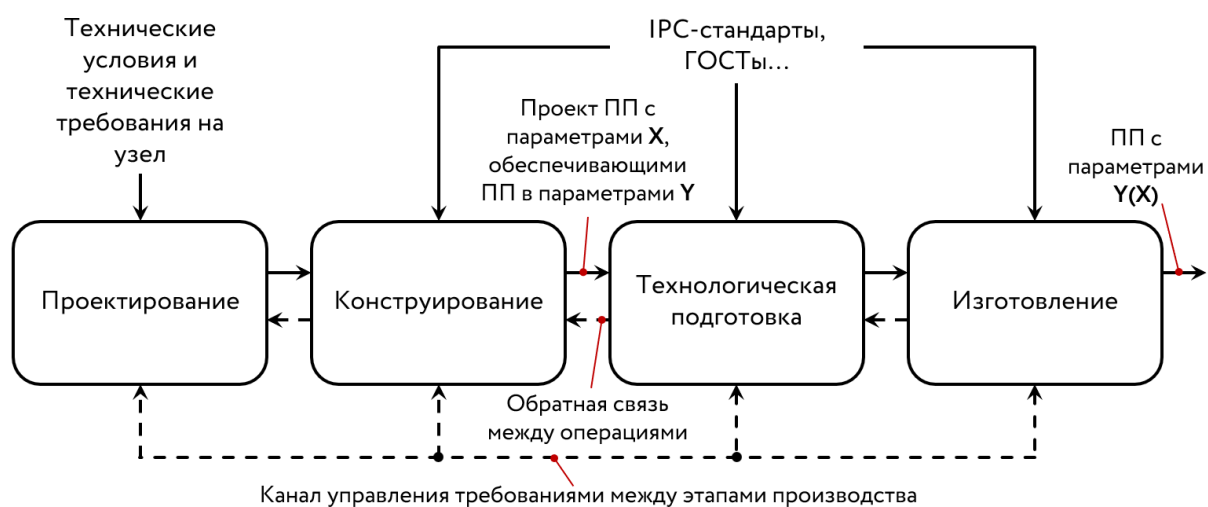
В настоящее время основной моделью разработки автоматизированных систем (АС) [74], которые включают в себя электронные устройства и ПП, в том числе, является водопадная или каскадная модель [75]. Каскадная модель разделяет процесс разработки на этапы и накладывает условие, что переход к следующему этапу может быть запущен только после завершения предыдущего этапа. Такая модель эффективна только в том случае, если исходные требования к изделию четко определены и известны на ранних этапах разработки, как и акторы, обеспечивающие выполнение работ по этапам. В случае применения каскадной модели наличие обратных связей между этапами либо полностью отсутствует, либо ограничено соседними операциями. Таким образом, такой способ межпроцессного взаимодействия приемлем, если одно предприятие покрывает все этапы производственного процесса изделия.

С учетом процесса всемирной глобализации наблюдается физическое разделение производственного процесса, т. е. проектированием и разработкой занимаются дизайн-центры, а изготовлением — отдельные фабрики-предприятия,

что еще больше ослабляет взаимосвязь между операциями и не позволяет сформировать единое представление об изделии и, соответственно, сам производственный процесс негативно влияет на выходное качество изделий. Т. е. для случая, описывающего производство ПП, велик риск того, что вектор состояния ПП  $X$ , описывающий ее параметры, будет значительно и непредсказуемо отличаться от изготовленного результата с вектором  $Y$  (Рисунок 8а).



а)



б)

Рисунок 8 — Диаграммы процессов производства ПП: а) текущая реализация (AS-IS); б) предлагаемая реализация (TO-BE)

Развитие предложенной концепции позволит сформировать отдельный общий канал управления требованиями для всех стадий создания изделия (Рисунок 8б), т. е. обеспечить непосредственную связь (как прямую, так и обратную) на каждом этапе со всеми другими этапами, что позволяет осуществить

гибкое управление требованиями к конечному продукту и участвующими акторами. Таким образом, конструкция устройства на этапе проектирования и разработки определяется не только на основе заранее заданных требований к качеству изделия, но и следующими этапами производственного процесса, что позволит предиктивно учитывать их влияние на изделие и, соответственно, их компенсировать. В прикладном плане это означает, что такой подход предоставляет возможность минимизации невязки между векторами  $X$  и  $Y$ .

### **1.5 Перечень исследуемых операций процесса изготовления печатных плат**

Реализация концепции оценки качества ПП величиной вероятности выхода годных требует проведения частных исследований отдельных ТО ее производства. Ввиду того, что ТП производства ПП достаточно вариативен и может содержать большое количество различных операций, то для исследования его необходимо ограничить перечнем операций, в большей степени влияющих на качество результата.

Основное конструктивное деление ПП [76], определяющее их технологический процесс — количество проводящих слоев и их расположение, по которому возможны варианты: односторонние печатные платы (ОПП), двусторонние печатные платы (ДПП) и многослойные печатные платы (МПП). Также ПП могут быть жесткие, гибкие и гибко-жесткие в зависимости от используемых базовых материалов.

Поскольку в настоящее время наиболее распространены химические методы изготовления ПП, то для составления перечня исследуемых операций далее рассмотрены химические процессы изготовления жестких ОПП, ДПП и МПП на основе химического субтрактивного метода, тентинг-метода и метода сквозных металлизированных отверстий, соответственно (Рисунок 9).

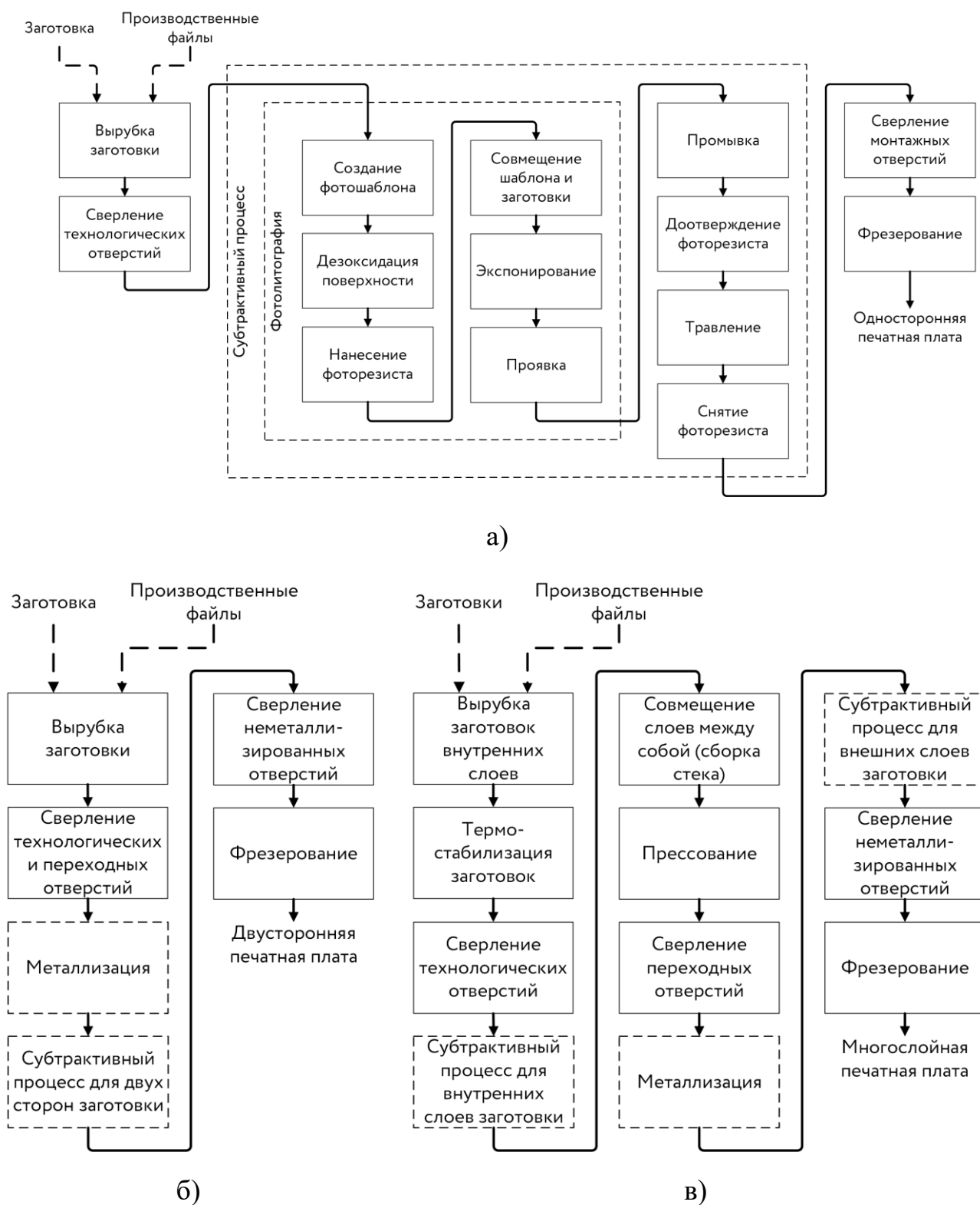


Рисунок 9 — Химические ТП изготовления жестких ПП, реализуемые на лабораторной линии: а) субтрактивный процесс изготовления ОПП; б) тентинг-процесс изготовления ДПП; в) процесс металлизации сквозных отверстий изготовления МПП на основе тентинг-процесса

В качестве параметров, определяющих сложность изготовления ПП, выбраны: количество слоев ПП  $N_{\text{пп}}$ , так как он непосредственно влияет на

количество ТО, необходимых для изготовления ПП (Таблица 1), а также величина привносимых погрешностей на ТО (Рисунок 10).

Таблица 1 — Количество основных операций в технологических процессах изготовления жестких ПП

| Технологическая операция                          | ОПП                                       | ДПП                                       | МПП                                                                                              |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Механическая обработка (сверление и фрезерование) | 3<br>(2 — сверление,<br>1 — фрезерование) | 3<br>(2 — сверление,<br>1 — фрезерование) | 4<br>(3 — сверление,<br>1 — фрезерование)                                                        |
| Совмещение                                        | 1                                         | 2                                         | $3N_{пп}/2 - 2$<br>( $N_{пп}$ — фотолитография,<br>$N_{пп}/2 - 2$ — совмещение внутренних слоев) |
| Фотолитография                                    | 1                                         | 2                                         | $N_{пп}$                                                                                         |
| Травление                                         | 1                                         | 1                                         | $N_{пп}/2$                                                                                       |
| Металлизация                                      | —                                         | 1                                         | 1                                                                                                |
| Прессование                                       | —                                         | —                                         | 1                                                                                                |

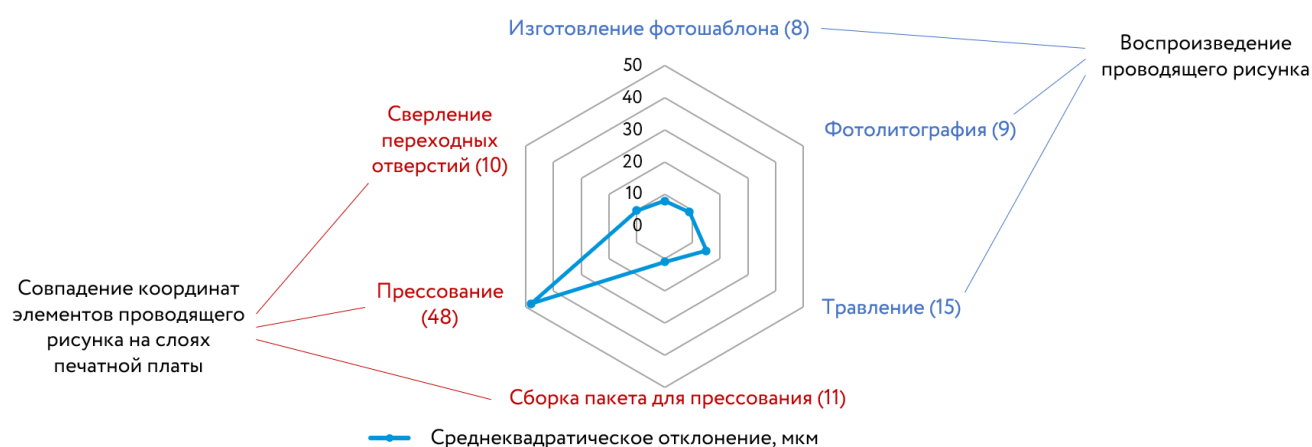


Рисунок 10 — Величины погрешностей на различных этапах производства ПП

На основе анализа величин погрешностей на различных этапах производства ПП [77], и предполагая, что пропорционально количеству используемых основных операций растет количество дефектов и, соответственно, необходимость оценки качества, то, для создания ПП с высокой плотностью межсоединений, сформирован перечень подлежащих исследованию ТО, включающий в себя:

- операции, которые влияют на воспроизведение проводящего рисунка на заготовке: фотолитография и травление;



— операции, которые влияют на совпадение координат элементов проводящего рисунка на разных слоях ПП: сверление и совмещение (слоев-заготовок при создании пакета ПП на этапе прессования, фотошаблона и заготовки на этапе фотолитографии).

Также стоит отметить, что при рассмотрении других химических методов изготовления ПП, например, комбинированных полуаддитивных методов [76], зависимость количества используемых операций от количества слоев меняется незначительно и тенденция сохраняется, а основным отличием является их реализация и последовательность выполнения.

## 1.6 Выводы по главе

В главе проведено исследование существующих способов оценки качества ПП, в ходе которого:

- 1) На основе выделенных направлений развития электроники определена необходимость развития производства ПП, как одного из основных элементов любого электронного устройства. При этом, для обеспечения экономической эффективности разработки качество ПП должно быть задано на ранних этапах производственного цикла и ограничено как снизу, так и сверху.
- 2) Исследованы возможные способы формирования количественной оценки качества ПП на основе вероятностно-статистических и физико-химических методов оценки надежности, а также на основе методов SPC. В ходе исследования определено предпочтительное использование в качестве основы методов SPC.
- 3) Определена необходимость разработки количественного критерия оценки качества ПП, обеспечивающего возможность его контроля и прогнозирования качества на всех этапах производственного цикла.
- 4) Сформирована концепция оценки качества ПП с помощью величины вероятности ее выхода годной после ТП ее изготовления. В качестве критериев годности выступает попадание заранее заданных

контролируемых параметров изделия в интервалы, величина которых определяется требованиями стандартов приемки. Конструктивные параметры проекта изделия и технологические параметры процесса изготовления в таком случае выступают в роли параметров, от которых зависит конечная вероятность выхода годной ПП.

- 5) На основе анализа ТП изготовления ПП определен перечень подлежащих исследованию ТО, включающий в себя: фотолитографию, травление, сверление и совмещение.

## **Глава 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫХОДА ГОДНОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ФОТОЛИТОГРАФИИ И ТРАВЛЕНИЯ**

### **2.1 Процесс фотолитографии**

Основной задачей ПП является создание связей между компонентами: как электрических посредством проводников, так и механических за счет диэлектрического основания. Поэтому, в первую очередь, нужно исследовать влияние параметров проектирования и ТП на качество выполнения данной задачи. В качестве начальной точки для исследования выбран процесс химического воспроизведения проводящего рисунка на заготовке как совокупность процессов фотолитографии и травления. Важность конструктивно-технологической оценки качества выбранного процесса обусловлена его широкой применимостью в современных процессах изготовления ПП, начиная от субтрактивного метода, заканчивая полуаддитивным и комбинированными методами [78].

При изготовлении ПП, одним из важнейших этапов производства является этап переноса проводящего рисунка на заготовку посредством нанесения на последнюю фоточувствительного материала с последующим воздействием на него ультрафиолетовым излучением, т. е. этап фотолитографии. Именно этап фотолитографии в большей степени определяет минимально воспроизводимые параметры проводящего рисунка ПП и влияет на возникновение дефектов в процессе их производства.

#### **2.1.1 Дефекты печатных плат, возникающие в процессе фотолитографии**

Для определения параметров конструкции ПП и параметров ТО, влияющих на вероятность изготовления платы в соответствии с требованиями приемки, произведена декомпозиция процесса фотолитографии [79–81] на этапы (Рисунок 11).

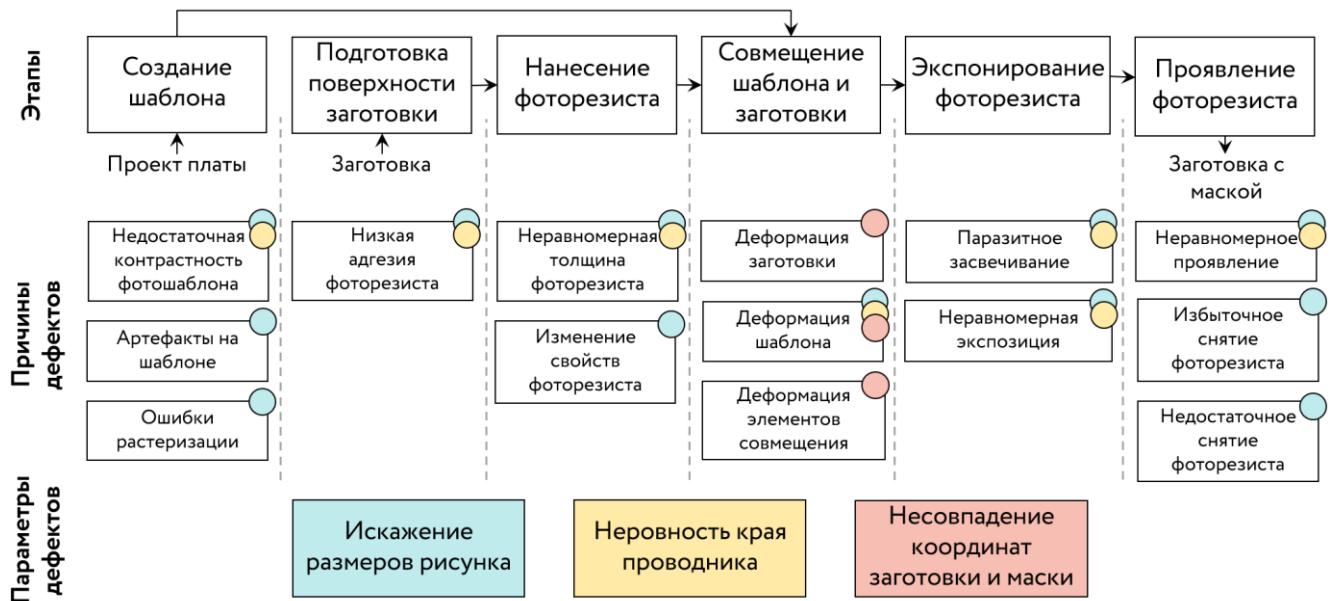


Рисунок 11 — Этапы процесса фотолитографии, причины возникновения дефектов по этапам и параметры, характеризующие дефекты (круги соответствующего обозначают связь между причинами и параметрами дефектов)

Для каждого этапа определены основные причины возникновения дефектов. с помощью группировки причин возникновения дефектов определены параметры, которыми могут быть описаны дефекты. Также для каждого из параметров определены количественные показатели, использование которых возможно при построении модели, описывающей получение годной заготовки в процессе фотолитографии:

- 1) искажение размеров рисунка ( $\delta_{expo}$ ) — разница между заложенными при проектировании размерами топологического рисунка и средним значением размера на изготовленном образце.
- 2) неровность края проводника ( $\Xi_{expo}$ ) — параметр, характеризующий разброс положения края фоторезистивной маски по его длине.
- 3) несовпадение координат заготовки и маски — изменение в процессе изготовления положения элементов проводящего рисунка, относительно заложенного при проектировании.

На рисунке 12 представлены основные величины, используемые при описании процесса фотолитографии:

- $W_{tr\_expo}$ ,  $W_{clr\_expo}$  — случайные величины описывающие ширину проводника и зазора после процесса фотолитографии;
- $W_{tr\_d}$  — значение ширины проводника, заданное в проекте печатной платы;
- $w_{expo}$  — среднее значение ширины проводника после фотолитографии;
- $\Xi_{expo}$  — случайная величина, описывающая неровность края проводника и характеризующая случайную погрешность операции;
- $\delta_{expo} = W_{tr\_d} - w_{expo}$  — параметр искажения размеров проводящего рисунка, характеризующий систематическую погрешность операции и выраженный разницей между проектируемой шириной проводника и средним значением ширины проводника после фотолитографии.

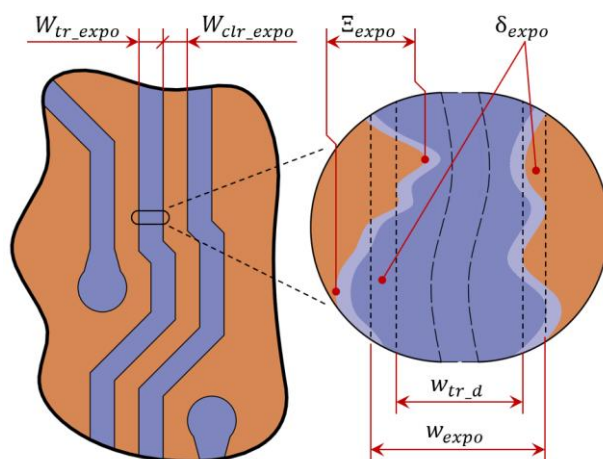


Рисунок 12 — Параметры искажения размеров рисунка  $\delta_{expo}$  и неровности края проводника  $\Xi_{expo}$  на заготовке после фотолитографии

Искажение размеров рисунка  $\delta_{expo}$  и неровность края проводника  $\Xi_{expo}$ , имеют общие причины возникновения:

- низкая контрастность фотошаблона;
- локальное изменение топологии на фотошаблоне (артефакты) в процессе его изготовления, эксплуатации или хранения;
- низкая адгезия фоторезиста;
- большая толщина слоя фоторезиста или неравномерность его толщины на поверхности заготовки;

- неравномерная экспозиция фоторезиста, обусловленная видом источника излучения;
- перетравливание или недотравливание фоторезиста в процессе проявки.

Несовпадение координат заготовки и маски, в свою очередь, является следствием:

- износа фотошаблона и изменения его геометрических размеров при изменении температуры и влажности окружения (несоблюдение условий хранения и эксплуатации);
- смещения фотошаблона;
- деформации заготовки.

Таким образом, разные причины возникновения дефектов позволяют разделить параметры на две группы, которые рассматривают печатные платы на разных уровнях: искажение размеров рисунка и неровность края проводника совокупно описывают влияние фотолитографии на отдельные элементы топологии (единичные показатели качества), в то время как несовпадение координат — влияние процесса на топологию в целом (интегральный показатель качества).

Несовпадение координат заготовки и маски тесно связано с явлением деформации, влияние которого в большей степени проявляется на операциях прессования и травления и, соответственно, имеет похожие причины возникновения дефектов. В таком случае имеет смысл построение обобщенной модели, описывающей явление деформации при производстве ПП [9, 82, 83]. Поскольку построение такой модели требует подробного рассмотрения смежных ТП, то дальнейшее рассмотрение сосредоточено на исследовании изменения параметров отдельных элементов топологии.

### **2.1.2 Математическая модель процесса фотолитографии**

Для описания процесса фотолитографии использовано упрощение, определяющее проводящий рисунок как совокупность проводящих дорожек и зазоров между ними, которые описываются параметром ширины. Тогда, основным требованием к топологии является соответствие полученных после фотолитографии значений параметра и заложенных при проектировании. Так как

после фотолитографии сами проводники еще отсутствуют, то в качестве ширины проводника можно использовать ширину покрывающей проводник маски.

Ширина проводника после экспонирования  $W_{tr\_expo}$  представляет из себя непрерывную случайную величину, описание которой возможно с помощью закона распределения. Поскольку на процесс фотолитографии оказывает влияние большое количество несвязанных друг с другом факторов, то, согласно центральной предельной теореме [84], можно предположить, что  $W_{tr\_expo}$  подчинена нормальному закону распределения с соответствующей функцией плотности  $f_{tr\_expo}(w)$  по формуле (4):

$$f_{tr\_expo}(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{expo}} e^{-\frac{(w-w_{expo})^2}{2\sigma_{expo}^2}}, \quad (4)$$

где:

- $w$  — параметр ширины проводника;
- $w_{expo}$  — среднее значение ширины проводника после фотолитографии (математическое ожидание, МО);
- $\sigma_{expo}$  — среднеквадратическое (СКО) отклонение ширины проводника после фотолитографии.

МО  $w_{expo}$  и СКО  $\sigma_{expo}$  связаны с определенными ранее параметрами искажения размеров рисунка  $\delta_{expo}$ , как величины изменения среднего значения ширины проводника на заготовке после фотолитографии относительно проектируемого значения  $w_{tr\_d}$ , и неровности края проводника  $\Xi_{expo}$ , как величины, характеризующей разброс. В таком случае для закона, описывающего  $W_{tr\_expo}$ , математическое ожидание  $w_{expo}$  является значением проектируемой ширины проводника  $w_{tr\_d}$  с учетом влияния искажения размеров топологии  $\delta_{expo}$  (5) привносимого процессом:

$$w_{expo} = w_{tr\_d} + \delta_{expo}. \quad (5)$$

Для определения параметра  $\sigma_{expo}$  неровность воспроизведения края  $\Xi_{expo}$  рассмотрена как нормально распределенная случайная величина, МО которой

равно нулю, что следует из определения самой величины, СКО —  $\xi$ , т. е.  $\Xi_{expo} \in N(0, \xi^2)$ .

Поскольку процесс экспонирования оказывает влияние на оба края проводника, то для определения разброса ширины нужно рассмотреть композицию распределений для каждого края, тем самым сформировав результирующий закон распределения, в котором математическое ожидание и дисперсия будут равны суммам соответствующих величин. Тогда среднеквадратическое отклонение для  $W_{tr\_expo}$  составляет  $\sqrt{2}\xi$ , и закон распределения ширины проводника после фотолитографии имеет вид  $W_{tr\_expo} \in N(w_{tr\_d} + \delta_{expo}, 2\xi^2)$ . При этом стоит отметить, что  $\delta_{expo}$  и  $\xi$  в общем случае являются функциями, которые зависят от параметров конструкции печатной платы (в частности, проектируемой ширины проводника  $w_{tr\_d}$ ), а также от технологии процесса экспонирования и технологических параметров процесса фотолитографии.

Зная закон распределения величины  $W_{tr\_expo}$ , определены допустимые пределы ее изменения, что возможно с использованием требований стандартов по проектированию и приемке ПП. Так, п.2.10.1.1 стандарта IPC-A-600G [70] определяет допустимое изменение ширины проводника: 20 % для плат с классом применения 3 и 2 (оборудование ответственного назначения и промышленные устройства соответственно), а также 30 % для класса применения 1 (потребительские устройства). Также п.2.10.1.2 стандарта определяет аналогичным образом требования к размеру зазора проводниками: 20 % для класса применения 3 и 30 % для классов применения 2 и 1.

Чтобы не рассматривать ширину проводника  $W_{tr\_expo}$  и ширину зазоров как отдельные случайные величины  $W_{clr\_expo}$ , введено ограничение на равенство проектируемых значений ширины проводника и зазора. Ограничение в большинстве случаев справедливо для участков с максимально плотным расположением проводников, которое преимущественно и определяет возможность изготовления ПП. Для такого случая можно сформировать общий критерий, накладывающий ограничение на изменение ширины проводника как в



меньшую, так и в большую сторону. Тогда для оценки качества ТП можно использовать вероятность  $P_{expo}$  получения заготовки, соответствующей требованиям приемки, что эквивалентно вероятности попадания случайной величины  $W_{tr\_expo}$  в заданный требованиями диапазон, что определяется выражением (6):

$$P_{expo} = P\{(1 - k_{min})w_{tr\_d} \leq w \leq (1 + k_{max})w_{tr\_d}\} \text{ или} \\ P_{expo} = \int_{(1-k_{min})w_{tr\_d}}^{(1+k_{max})w_{tr\_d}} f_{tr\_expo}(w, w_{tr\_d}, \delta_{expo}, \xi) dw, \quad (6)$$

где  $k_{min}$ ,  $k_{max}$  — коэффициенты, характеризующие изменение ширины проводника в большую и меньшую стороны, соответственно, в зависимости от требуемого класса применения устройства.

На рисунке 13 приведен пример определения вероятности изготовления заготовки с минимальной проектируемой шириной проводника  $w_{tr\_d} = 250$  мкм в соответствии с требованиями приемки по классу применения 3 по стандарту IPC-A-600-G (допускается отклонение на 20 % от заложенного при проектировании значения) для операции фотолитографии с искажением размеров проводящего рисунка  $\delta_{expo} = -20$  мкм и неровностью края проводника  $\xi = 18$  мкм (СКО ширины проводника после фотолитографии  $\sigma_{expo} = \sqrt{2}\xi = 25$  мкм). Вероятность бездефектного изготовления заготовки определяется как площадь ограниченной функцией плотности процесса  $f_{tr\_expo}(w)$  и осью абсцисс по вертикали и полями допуска по горизонтали. Тогда, с учетом подстановки в выражение (6) функции плотности нормального распределения  $f_{tr\_expo}(w)$ , величина  $P_{expo}$  может быть описана в виде разности функций Лапласа  $\Phi(x)$  (7):

$$P_{expo} = \Phi\left(\frac{k_{max}w_{tr\_d} - \delta_{expo}}{\sqrt{2}\xi}\right) - \Phi\left(\frac{-k_{min}w_{tr\_d} - \delta_{expo}}{\sqrt{2}\xi}\right), \quad (7)$$

где  $\Phi(x)$  — функция Лапласа от параметра  $x$  (8):

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2} dt. \quad (8)$$

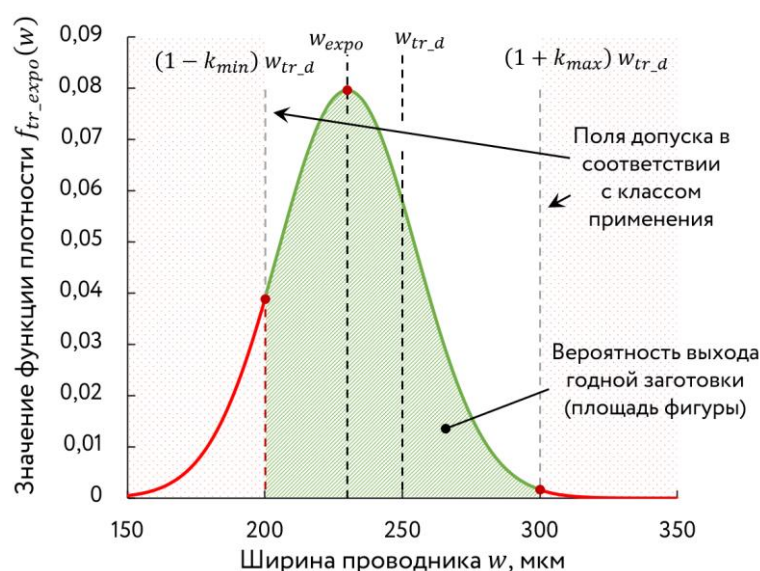


Рисунок 13 — Определение вероятности изготовления заготовки в соответствии с требованиями приемки как площади, ограниченной функцией плотности процесса  $f_{tr\_expo}(w)$  и осью абсцисс по вертикали и полями допуска по горизонтали

Таким образом, определив параметры  $\delta_{expo}$  и  $\xi$  для используемого процесса фотолитографии, предоставляется возможность количественно определить вероятность бездефектного изготовления заготовки в соответствии с предъявляемыми требованиями приемки до непосредственного производства. Определение параметров  $\delta_{expo}$  и  $\xi$  возможно на основе априорной информации из технологической документации для установок экспонирования, однако, принимая во внимание изменение характеристик качества процессов во времени и большое количество определяющих результат переменных, такой способ пригоден только для приблизительных оценок. Получение более точных результатов возможно путем проведения периодических экспериментов на используемой линии или внедрения систем контроля на основе автоматической оптической инспекции (АОИ), обеспечивающих непрерывный анализ характеристик на основе изготавливаемой продукции.

### 2.1.3 Экспериментальное исследование процесса фотолитографии

Определение параметров операции фотолитографии  $\delta_{expo}$  и  $\xi$ , а также проверка адекватности модели оценки вероятности производства заготовок в соответствии с требованиями приемки осуществлены экспериментально в

лабораторных условиях на участке контактного экспонирования согласно разработанной методике (Рисунок 14).



Рисунок 14 — Методика определения технологических параметров операции фотолитографии

Методика экспериментального исследования операции фотолитографии состоит из трех этапов:

- 1) формирование выборки изображений для последующей обработки — этап включает в себя изготовление серии фотошаблонов и соответствующих им заготовок с тестовой топологией, состоящей из вертикально горизонтально и диагонально расположенных проводников с разным значением проектируемой ширины, их оцифровку с помощью сканера, сегментацию полученных изображений для формирования группы изображений с одинаковыми параметрами и расположением проводников для обеспечения удобства их дальнейшей обработки;
- 2) цифровая обработка изображений, на котором для каждого изображения произведено устранение шумов, определение компьютерными методами распределения ширины проводника, проверка соответствия распределения нормальному, расчет частоты выхода годных участков

проводников и статистических характеристик: выборочных среднего и СКО;

- 3) анализ результатов обработки изображений — на этапе исследовано изменение статистических характеристик для всего набора данных и зависимостей параметров  $\delta_{expo}$  и  $\xi$  от направления печати и проектируемой ширины проводника, построены модели вероятности  $P_{expo}$  выхода годных проводников и проведено сравнение результатов моделирования с частотами  $q$ , полученными экспериментально, а также определены возможности коррекции изготавливаемой топологии ПП для компенсации систематической погрешности операции фотолитографии.

Задачей первого этапа является формирование выборки изображений проводников, пригодных для дальнейшего анализа изменения параметров топологии в процессе изготовления, а также производственных погрешностей. Этап состоит из трех операций: проектирования тестовой топологии, изготовления образцов и их оцифровки.

В эксперименте использована топология  $225 \times 175$  мм, (Рисунок 15) состоящая из отдельных прямоугольных участков шириной  $w_s = 21$  мм и высотой  $h_s = 17$  мм, внутри каждой из которых вертикально, горизонтально или диагонально расположены проводники с одинаковой шириной  $w_{tr\_d}$ . Зазор между проводниками внутри одного участка также одинаков и равен  $w_{tr\_d}$ . Параметр ширины проводника и зазора  $w_{tr\_d}$  изменяется между областями от 100 мкм до 1500 мкм с увеличением размера шага по мере роста параметра от 25 мкм до 500 мкм. Негативные фотошаблоны напечатаны на пленке для монохромной лазерной печати Kimoto A4 OHP/DTP Kimolec PF-90S с помощью принтера HP LaserJet Pro 400 M401dn (разрешение печати 1200 dpi), а также обработаны спреем Kruse Density Toner для увеличения оптической плотности тонера.

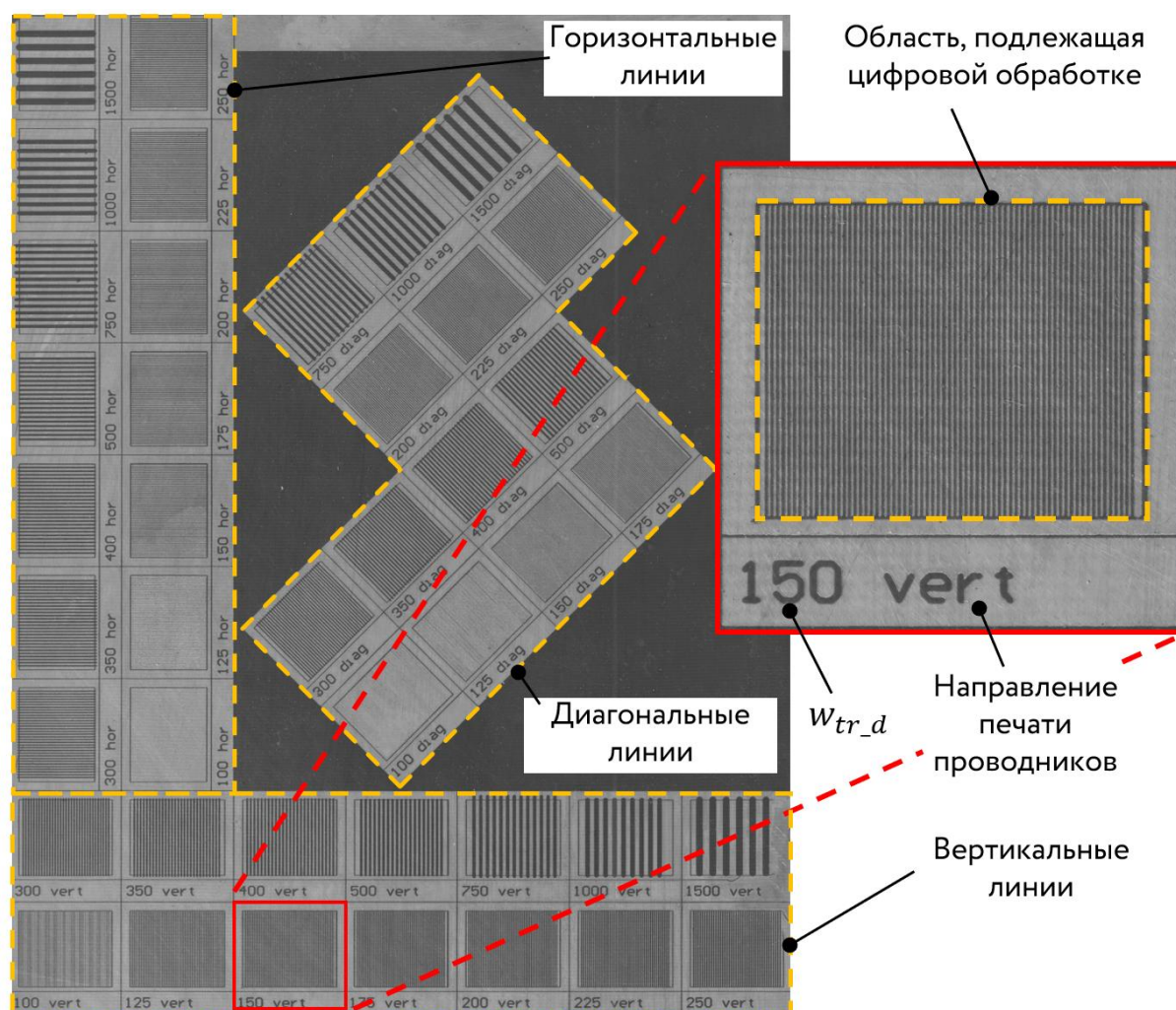


Рисунок 15 — Изображение исследуемой заготовки после фотолитографии

Для создания заготовок использован двусторонний фольгированный стеклотекстолит (FR-4, толщина ламината 1,5 мм, толщина слоев фольги 18 мкм). Процесс изготовления образцов включает в себя: механическую дезоксидацию поверхностей заготовки; предварительный нагрев до 70°C; нанесение негативного сухого пленочного фоторезиста (толщина 40 мкм) при температуре 105 °C; контактное экспонирование (время экспонирования составляет 21 с и определено клином Штоуффера [85, 86], ступень 9); проявку в 1 % водном растворе кальцинированной соды при температуре 29 °C в течение 1 минуты.

Полутоновые изображения образцов получены с помощью сканера Canon CanoScan LiDE 400 (разрешение 4800 dpi, формат TIFF, 8 бит на пиксел), так как анализ изображений, как метод исследования, по сравнению с проведением ручных

измерений объект-микрометром более предпочтителен, позволяя многократно увеличить количество измерений и исключить человеческий фактор.

Для обеспечения возможности потоковой автоматической обработки на всех полученных изображениях определены участки с проводниками одной ширины; произведен их поворот, обеспечивающий вертикальное положение проводников на изображении; затем полученные участки разбиты на отдельные изображения равного размера, которые отсортированы в соответствии с типом образца (фотошаблон или заготовка после проявки), направлением печати проводников на фотошаблоне (вертикальное, горизонтальное или диагональное), номером образца, из которого получено изображение, и проектируемой шириной проводника.

Таким образом, в результате выполнения описанных операций сформирована выборка отсортированных и размеченных изображений проводников на фотошаблонах и заготовках.

Второй этап эксперимента включает в себя автоматическую компьютерную обработку изображений (листинг программы для обработки представлен в Приложении В), позволяющую сформировать для каждого из них выборку ширины проводника, основные статистические характеристики (выборочное среднее и СКО), а также значения частот выхода годных участков проводника, соответствующих требованиям стандартов по классам применения.

Сначала произведена предварительная обработка изображения: наложение фильтра Гаусса (размер ядра —  $9 \times 9$  пикселей); пороговая бинаризация для сегментации изображений на участки с проводниками и зазорами; устранение шумов малого размера последовательным применением морфологических операторов открытия и закрытия (структурирующий элемент — квадрат  $5 \times 5$  пикселей) и медианного фильтра (размер ядра —  $5 \times 5$  пикселей).

Основная сложность предварительной обработки заключается в проведении корректной бинаризации изображений (Рисунок 16).



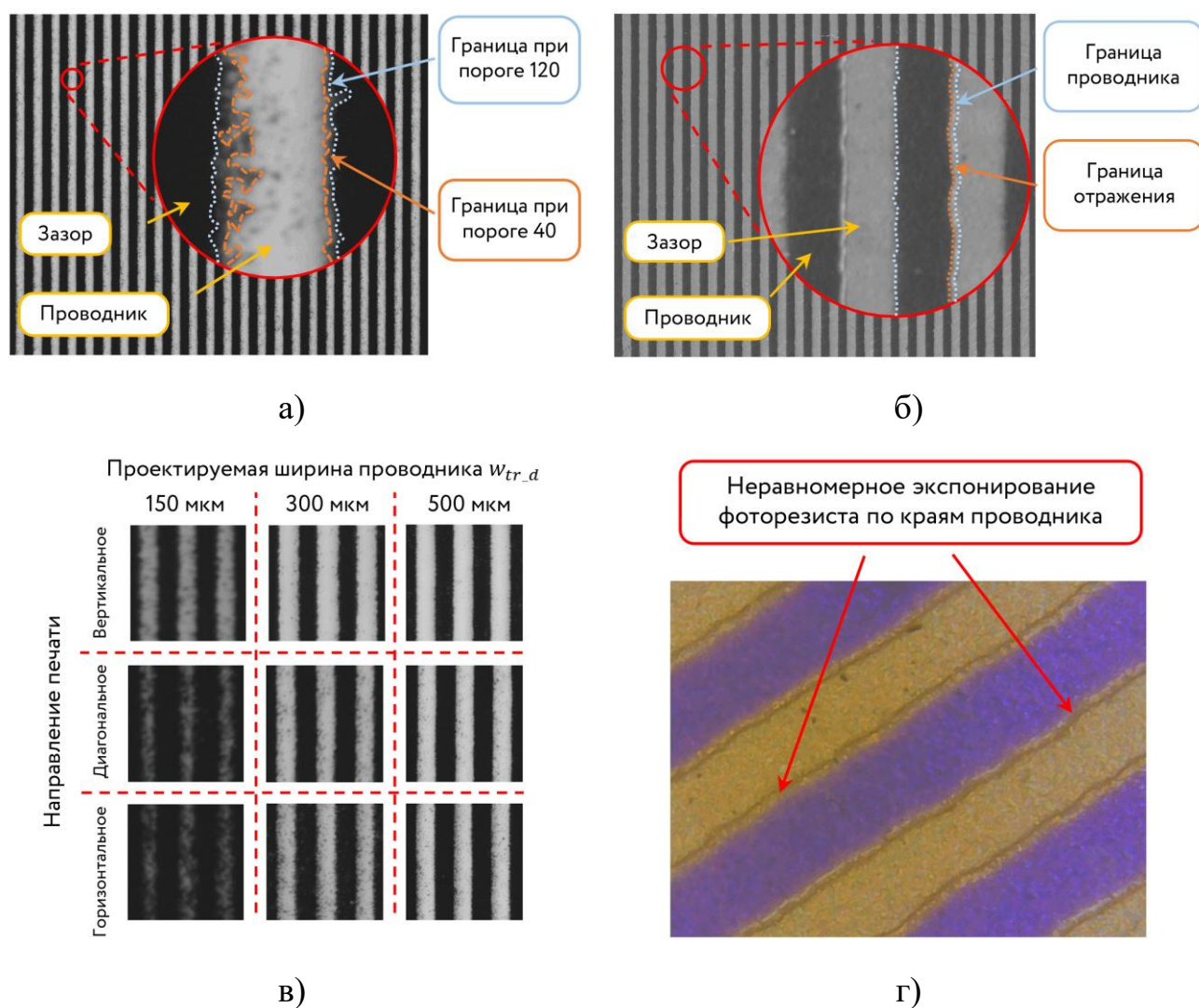


Рисунок 16 — Факторы, затрудняющие цифровую обработку изображений: а) изменение границ проводника на изображении фотошаблона при разных порогах бинаризации; б) смещение границы проводника на изображении заготовки после экспонирования, обусловленное отражением света; в) изменение качества проводников на фотошаблоне в зависимости от направления печати и проектируемой ширины проводника; г) неравномерное экспонирование фоторезиста (фотография получена с помощью цифрового микроскопа)

Бинаризация осложняется несколькими факторами:

- к обработке предъявляется выборка изображений различной природы (фотошаблоны и заготовки после экспонирования), которые должны иметь разные пороги бинаризации (Рисунок 16а, б);
- на изображениях фотошаблонов граница проводника имеет плавный переход, что влечет за собой сильное смещение края проводника при изменении порога бинаризации и, следовательно, неопределенность

значения порога бинаризации, соответствующего реальной границе экспонирования (Рисунок 16а);

- на изображениях фотошаблонов с увеличением ширины проводников наблюдается связанное с большим светопропусканием изменение уровня яркости на прозрачных участках, что также влияет на определение положения границы между проводником и зазором (Рисунок 16в);
- наличие плавного перехода на фотошаблонах является причиной неравномерной проявки фоторезиста, из-за чего фоторезист, накрывающий края проводников на заготовках, обесцвечивается и формирует отражения света, которые не позволяют корректно определить край проводника (Рисунок 16г). На рисунке 16б, приведен пример обрабатываемого изображения заготовки после проявки, на котором средний цвет пикселей в градации от 0 до 255 (0 — черный, 255 — белый) в области проводников составляет 75, в области зазоров — 145, а в области отражения — 160, что выше порога бинаризации и соответствует области зазоров, а не проводников.

Таким образом, корректная бинаризация всей выборки изображений фотошаблонов невозможна с помощью одного порога, также в силу однородности изображений нет необходимости в использовании локальных алгоритмов бинаризации. Для бинаризации выбран алгоритм глобальной бинаризации Оцу [87, 88], который подразумевает разделение пикселей на два класса и использует в качестве параметра оптимизации для поиска порога минимум внутриклассовой дисперсии. Используемый в алгоритме критерий оптимизации позволяет получить значение порога для каждого изображения в зависимости от его гистограммы. с учетом того, что на фотошаблоне проводники имеют большую яркость относительно зазоров, а на заготовках — наоборот, то для дальнейшего анализа произведена инверсия цветов на бинаризованном изображении фотошаблона.

Переходя от изображений фотошаблонов к заготовкам, для их бинаризации также использован алгоритм Оцу. Компенсация некорректного распознавания,



обусловленного отражением света от края фоторезиста, реализована с помощью добавления постоянной величины смещения, так как отражение не изменяет форму края проводника (Рисунок 16б). Значение величины смещения определено для каждого изображения эмпирически на основе наложения бинаризованного изображения на исходное, а также контрольными измерениями с помощью объект-микрометра.

Также на данном этапе из выборки исключены изображения, содержащие шаблоны и заготовки с горизонтальным и диагональным расположением проводников со значением проектируемой ширины проводника меньше 150 мкм. При бинаризации изображений соответствующих шаблонов выявлено, что различия между цветами зазора и проводника незначительны и находятся на уровне разброса, что не позволяет произвести бинаризацию корректно. Недостаточная контрастность фотошаблона, в свою очередь, служит причиной полного снятия фоторезиста в процессе проявки.

На следующем этапе компьютерной обработки произведено формирование выборки ширин проводников для каждого изображения путем построчного прохода, что возможно благодаря расположению проводников на всех изображениях вертикально. Тогда, ширина одного проводника — это количество идущих подряд горизонтально черных пикселей на бинаризованном изображении. Для устранения влияния ложных срабатываний [89], обусловленных присутствующими на анализируемых образцах дефектами, а также цифровым шумом сканера, из результирующей выборки исключены значения, которые отличаются от проектируемого значения более чем на 70 %, а также произведено склеивание проводников в случае, если расстояние между ними менее 25 мкм. Затем для каждого значения ширины определено его соответствие классу применения: зеленый соответствует классу 3 (наиболее жесткие требования, изменение ширины относительно проектируемого значения должно не более 20 %), желтый — классу 1 (нижняя граница годности, недопустимы отклонения более 30 %), красный — дефект, белый — ложное срабатывание (Рисунок 17а). На основе полученной выборки определены частоты получения годных проводников

для каждого класса применения, т. е. экспериментально полученные статистические аналоги вероятности.

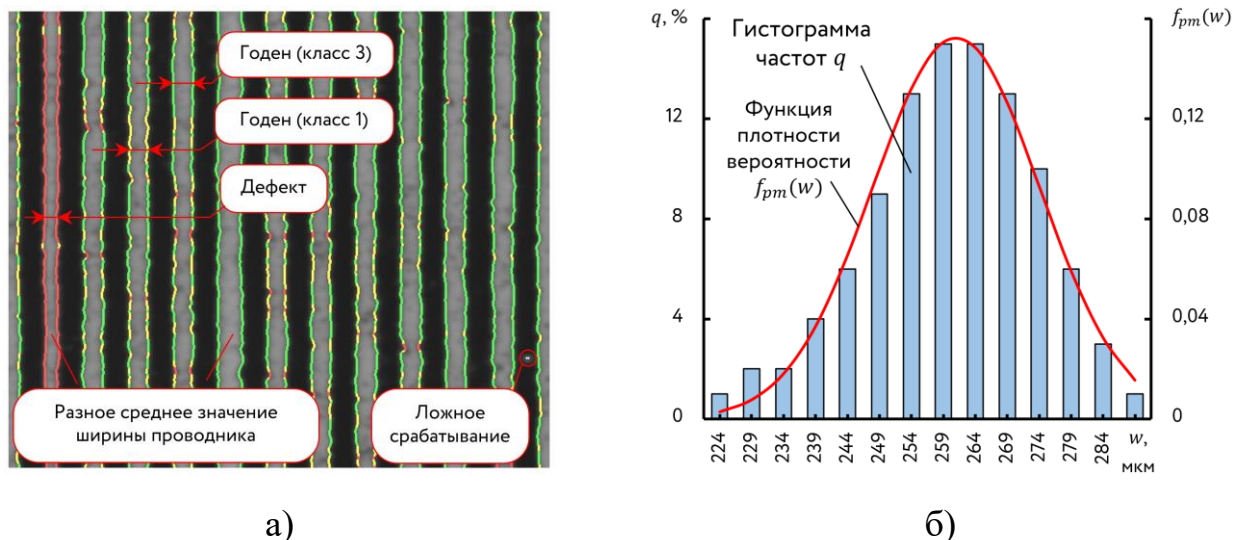


Рисунок 17 — Результаты обработки изображений: а) цветовая маркировка распознанных ширин (фотошаблон,  $w_{tr\_d} = 150$  мкм, вертикальное направление печати); б) сопоставление гистограммы и функции плотности распределения  $f_{pm}(w)$  для одного из изображений (фотошаблон,  $w_{tr\_d} = 300$  мкм, диагональное направление печати)

Поскольку все обрабатываемые изображения описывают прямоугольную область одинакового размера (ширина  $w_s = 21$  мм, высота  $h_s = 150$  мм), то объем полученных выборок ширин  $n$  уменьшается с увеличением  $w_{tr\_d}$ , и приближенно может быть описан выражением (9):

$$n \approx \text{floor} \left( \frac{w_s - w_{tr\_d}}{2w_{tr\_d}} \right) \cdot h_s \frac{r_{scan}}{k_{inch}}, \quad (9)$$

где:

- $\text{floor}(x)$  — оператор округления аргумента  $x$  до целого в меньшую сторону;
- $r_{scan}$  — разрешение сканирования, 4800 dpi;
- $k_{inch}$  — коэффициент преобразования из дюймов в миллиметры.

Выражение (9) состоит из двух множителей: первый описывает количество проводников на изображении по горизонтали, округленное до целого в меньшую сторону, а второй — количество пикселей в изображении по вертикали и, соответственно, количество измерений для одного проводника. Тогда,

предполагаемый размер выборки для изображений с минимально рассматриваемой шириной проводника 100 мкм должен составлять около 334 тысяч, а для 1500 мкм — около 19 тысяч.

На завершающем этапе компьютерной обработки изображения на основе выборки ширин построена гистограмма распределения и проведена проверка на соответствие нормальному закону распределения. На рисунке 17б представлено сопоставление гистограммы частот  $q$  (отношения количества попадающих в интервал измерений к общему количеству измерений, выраженного в процентах) одного из обрабатываемых изображений фотошаблона с функцией плотности нормального распределения  $f_{pm}(w)$ , параметры которого получены методом моментов [91]. Поскольку размеры обрабатываемых выборок велики, то применение непосредственно к ним статистических критериев согласия влечет за собой появление ложноотрицательных результатов, обусловленных увеличенными требованиями к отклонениям. Поэтому для определения соответствия экспериментальных данных нормальному закону распределения использовалась визуальная оценка гистограмм, а также проверка статистическими критериями Колмогорова-Смирнова и Д'Агостино выборок, уменьшенных случайным образом до 1000 элементов [92]. По результатам проведенной проверки в 30 % случаев нет оснований полагать, что выборки не соответствуют нормальному распределению с уровнем значимости 1 %.

Анализ оставшейся части выборки позволил выявить три основные причины отличия распределения от нормального:

- 1) на изображениях с проводниками высокого класса точности с горизонтальным и диагональным направлением печати (100, 125 мкм) отсутствуют элементы проводящего рисунка, поэтому они исключены из дальнейшего рассмотрения;
- 2) ошибки, обусловленные растеризацией изображения топологии принтером при печати — на гистограммах присутствуют пики, расстояние между которыми соответствует размеру одного пиксела — при используемом разрешении печати 1200 dpi размер пиксела составляет

21 мкм; этот эффект также отчетливо виден на изображениях фотошаблонов с вертикальным направлением печати линий (Рисунок 17а), на которых среднее значение ширины изменяется от проводника к проводнику;

3) ошибки оцифровки, выражающиеся в наличии пустых интервалов на гистограмме.

На рисунке 18 приведены гистограммы для трех образцов фотошаблонов с вертикальным расположением проводников. Отсутствие на некоторых значениях ширины столбцов диаграмм обусловлено ошибками растеризации сканера, поскольку в данном случае значение ширины проводника определяется как дискретная величина, которая равна произведению целого числа пикселей проводника на изображении и коэффициента преобразования пикселей в микроны (1 пиксел приблизительно равен 5 мкм при используемом разрешении сканирования 4800 dpi).

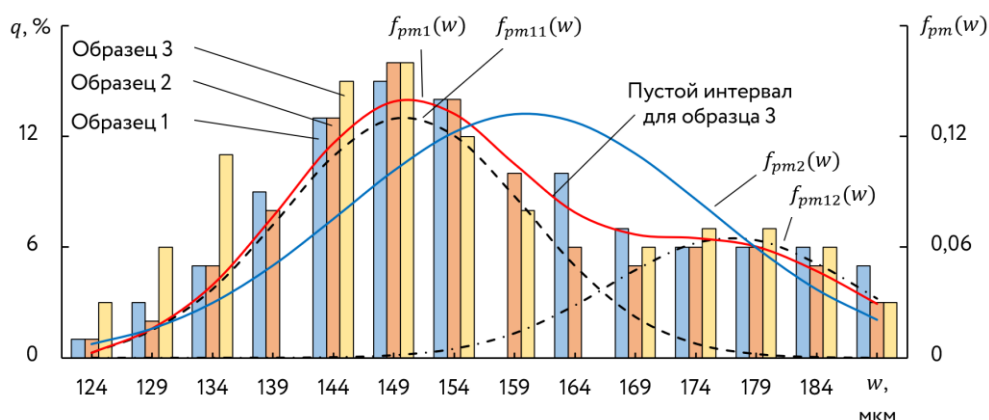


Рисунок 18 — Аппроксимация бимодального распределения ширины проводника на фотошаблоне, обусловленного ошибками растеризации, нормальным унимодальным распределением ( $w_{tr\_d} = 175$  мкм, вертикальное направление печати)

Для каждого из образцов справедливо бимодальное распределение  $N_{pm1}$ , состоящее из двух близких к нормальным распределений:

—  $N_{pm11} \in N(m_{11} = 154, \sigma_{11}^2 = 100)$ ;

—  $N_{pm12} \in N(m_{11} = 177, \sigma_{12}^2 = 100)$ .

При этом соотношение появления  $N_{pm11}$  к  $N_{pm12}$  — 2 к 1. Законы распределений имеют соответствующие функции плотности вероятности  $f_{pm11}(w)$  и  $f_{pm12}(w)$ . Таким образом, схожий бимодальный характер распределения ширины проводника на разных образцах для указанного случая (вертикальное направление печати,  $w_{tr\_d} = 175$  мкм) нельзя считать случайным, и он объясняется ошибками растеризации принтера.

Поскольку ошибки растеризации — это, по существу, результат математического округления, то в значение границы проводника на фотошаблоне может сдвигаться от проектируемого значения на 1 пиксел, что определяет наилучшие результаты печати в пределах  $\pm 2$  пиксела (или  $\pm 40$  мкм для используемого принтера с разрешением 1200 dpi). Чтобы будущие результаты в меньшей степени зависели от растеризации, в качестве исследуемых параметров выбраны выборочное среднее и СКО, тем самым аппроксимируя распределение нормальным с большим параметром дисперсии — для примера на рисунке 18 аппроксимирующее распределение имеет параметры  $N_{pm2} \in N(m_2 = 160, \sigma_2^2 = 225)$  и описывается функцией плотности  $f_{pm2}(w)$ .

На завершающем этапе эксперимента проведен анализ изменения статистических характеристик в зависимости от направления печати и проектируемой ширины проводника; проведена оценка возможности формирования на его основе математических моделей, описывающих изменение характеристик; сформированы рекомендации по изменению топологии для компенсации изменения ширины проводника и проведена проверка их эффективности.

Сначала произведено усреднение значений выборочных средних и среднеквадратических отклонений, полученных с различных заготовок, а также построены графики  $\delta_{pm}(w_{tr\_d})$ , описывающие разницу между выборочным средним и проектируемым значением в зависимости от последнего (Рисунок 19а) для результатов с фотошаблонов. На полученном графике выделены следующие особенности:

- 1) зависимости имеют схожую форму, однако имеют разное вертикальное смещение;
- 2) с увеличением проектируемой ширины наблюдается плавное уменьшение по модулю  $\delta_{pm}$  до значения ширины около 400 мкм с выходом на плато, на котором вертикальные проводники имеют наименьшее различие от проектируемого значения — шире на 10 мкм, диагональные — уже на 20 мкм, горизонтальные — уже на 40 мкм.

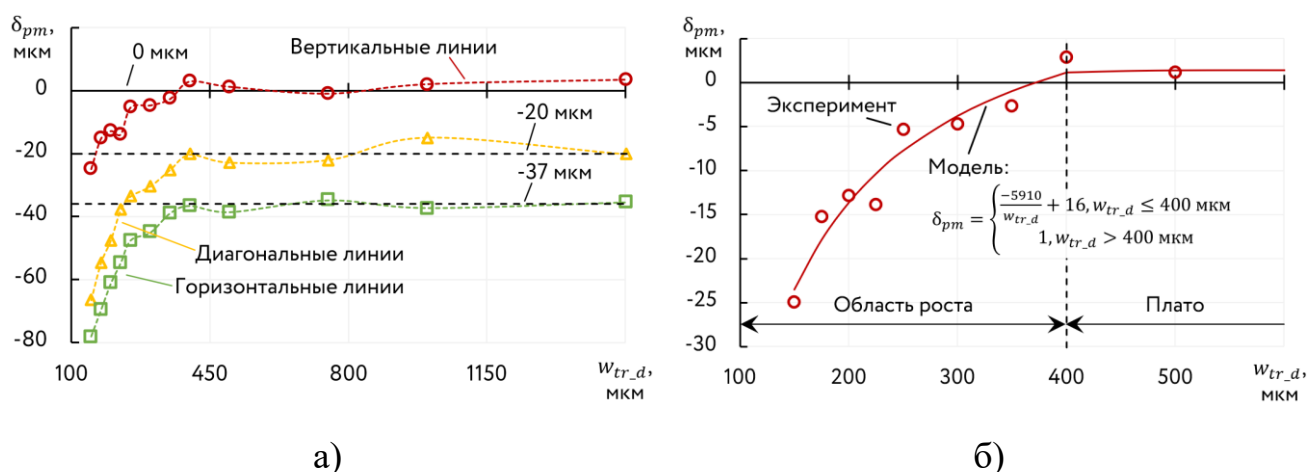


Рисунок 19 — Разница между шириной проводника на фотошаблоне  $w_{pm}$  и проектируемым значением  $w_{tr,d}$ : а) сравнение результатов для разных направлений печати; б) математическая модель  $w_{tr,d} \delta_{pm}(w_{tr,d})$  для вертикального направления печати проводников

Таким образом, принтер обеспечивает разное качество воспроизведения проводников, наибольшее соответствие наблюдается при печати вертикальных линий, но в большинстве случаев проводники имеют меньшую ширину относительно проектируемых значений (параметр  $\delta_{pm}$  меньше нуля).

Аналогичным образом исследовано поведение выборочного СКО ширины проводника  $\sigma_{pm}$ , которое остается постоянным при изменении ширины проводника, а при изменении направления печати меняется незначительно мало: для вертикальных проводников 14 мкм, для диагональных — 18 мкм, для горизонтальных — 23 мкм.

По полученным экспериментальным данным построены модели изменения ширины проводника на фотошаблоне  $\delta_{pm}(w_{tr,d})$  для каждого направления печати (Рисунок 19б). Модели имеют кусочно-заданный вид (10): на участке роста (до

400 мкм) функция описана гиперболой с параметрами  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , на плато — постоянным значением  $\theta_3$ . Значения параметров моделей  $\theta_1.. \theta_3$  определены методом наименьших квадратов (МНК): для вертикальных проводников  $\theta_1 = -6429$ ,  $\theta_2 = 29$ ,  $\theta_3 = 12$ ; для диагональных —  $\theta_1 = -10866$ ,  $\theta_2 = 7$ ,  $\theta_3 = -19$ ; для горизонтальных —  $\theta_1 = -10231$ ,  $\theta_2 = -10$ ,  $\theta_3 = -37$ . Коэффициенты детерминации  $R^2$  полученных моделей составляют 0,94, 0,98 и 0,98 соответственно.

$$\delta_{pm}(w_{tr\_d}) = \begin{cases} \frac{\theta_1}{w_{tr\_d}} + \theta_2, & w_{tr\_d} \leq 400 \text{ мкм} \\ \theta_3, & w_{tr\_d} > 400 \text{ мкм} \end{cases}. \quad (10)$$

Аналогичным образом проанализированы зависимости для разницы между выборочным средним и проектируемым значением для заготовки после экспонирования  $\delta_{expro}$  и проведен сравнительный анализ с предыдущими результатами, полученными для фотошаблона, а также с результатами измерений ширины проводников объект-микрометром (Рисунок 20а).

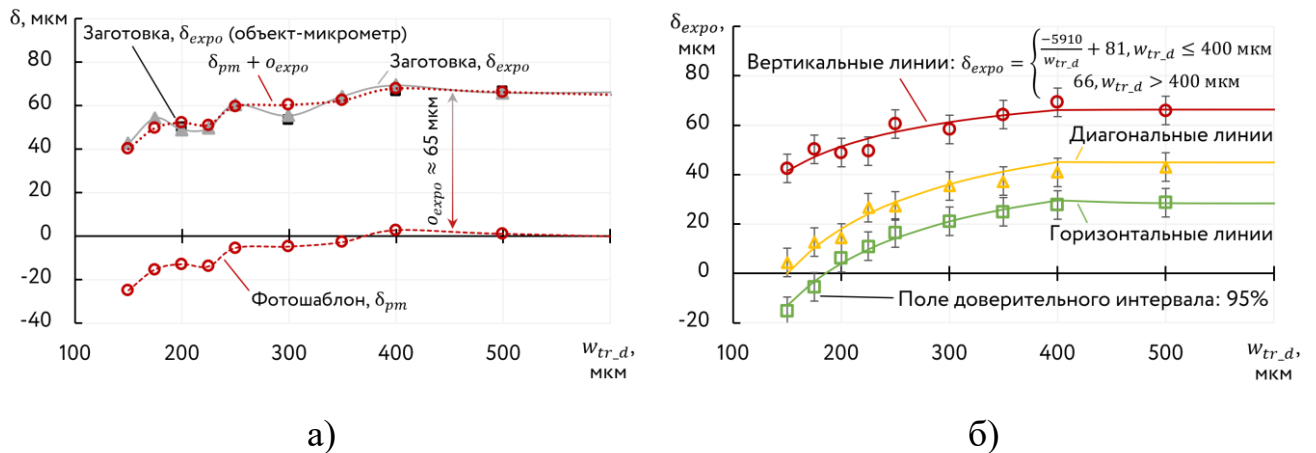


Рисунок 20 — Построение модели  $\delta_{expro}(w_{tr\_d})$ : а) сравнение параметра искажения проводящего рисунка на фотошаблоне  $\delta_{pm}$  и образце после экспонирования  $\delta_{expro}$  (вертикальное направление печати); б) сопоставление построенных моделей  $\delta_{expro}(w_{tr\_d})$  для разных направлений печати (сплошные линии) и результатов эксперимента (маркеры)

По построенным графикам сделаны выводы о том, что характер изменения параметров  $\delta_{pm}$  и  $\delta_{expro}$  совпадает, однако величина  $\delta_{expro}$  имеет постоянное смещение  $\delta_{expro}$  около 65 мкм, т. е. в процессе экспонирования происходит

увеличение ширины проводника. Также подтверждена согласованность измерений с результатами, полученными с помощью объект-микрометра. Изменения СКО ширины проводника на заготовках после экспонирования  $\sigma_{expo}$  относительно результатов, полученных с фотошаблонов  $\sigma_{pm}$ , незначительны, а потому в качестве оценки СКО  $\sigma_{expo}$  использовано среднее, рассчитанное по всем значениям, которое составляет 18 мкм.

Тогда математическая модель, связывающая среднее значение ширины изготовленного проводника  $w_{expo}$  и спроектированного  $w_{tr\_d}$  описывается формулой (11):

$$w_{expo}(w_{tr\_d}) = w_{tr\_d} + \delta_{expo}(w_{tr\_d}) = w_{tr\_d} + \delta_{pm}(w_{tr\_d}) + o_{expo}. \quad (11)$$

На рисунке 20б представлено сопоставление построенных моделей  $w_{expo}(w_{tr\_d})$  для разных направлений печати и результатов эксперимента.

Предполагая, что ширина изготовленного проводника  $W_{expo}$ , как случайная величина, подчинена нормальному закону распределения с математическим ожиданием  $w_{expo}(w_{tr\_d})$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{expo}$ , определена вероятность выхода годной заготовки после процесса фотолитографии  $P_{expo}$  как вероятность попадания ширины изготовленного проводника в поле допуска  $\pm 20\%$  для удовлетворения требований класса применения 3, а также в допуска  $\pm 30\%$  — для класса применения 1 (Рисунок 21).

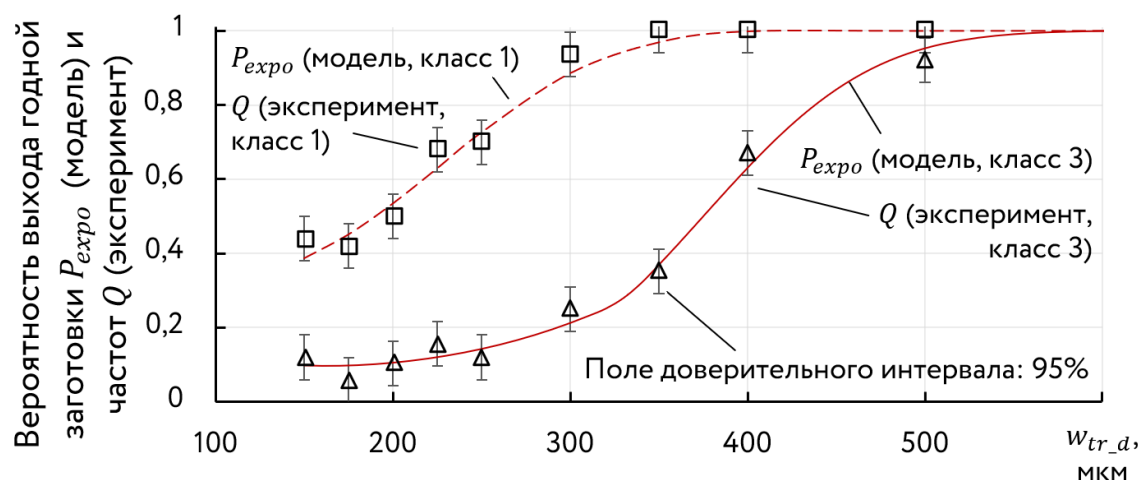


Рисунок 21 — Сравнение результатов моделирования величины  $P_{expo}$  с экспериментальными значениями частот  $q$  для вертикального направления печати



Совмещение результатов моделирования вероятности  $P_{expo}$  и экспериментально полученных нормализованных значений частот выхода годных проводников  $q$ , полученных на этапе компьютерной обработки, подтверждают адекватность разработанной модели (7): расхождение между результатами моделирования и экспериментальными данными составляет менее 10%, результаты моделирования попадают в поле 95% доверительного интервала результатов эксперимента.

Затем проведено сравнение результатов воспроизведения проводников для разных направлений печати линий (Рисунок 22а–в). В качестве количественного критерия сравнения использована проектируемая ширина проводника, при которой значение вероятности изготовления в соответствии с требованиями стандартов составляет 0,97.

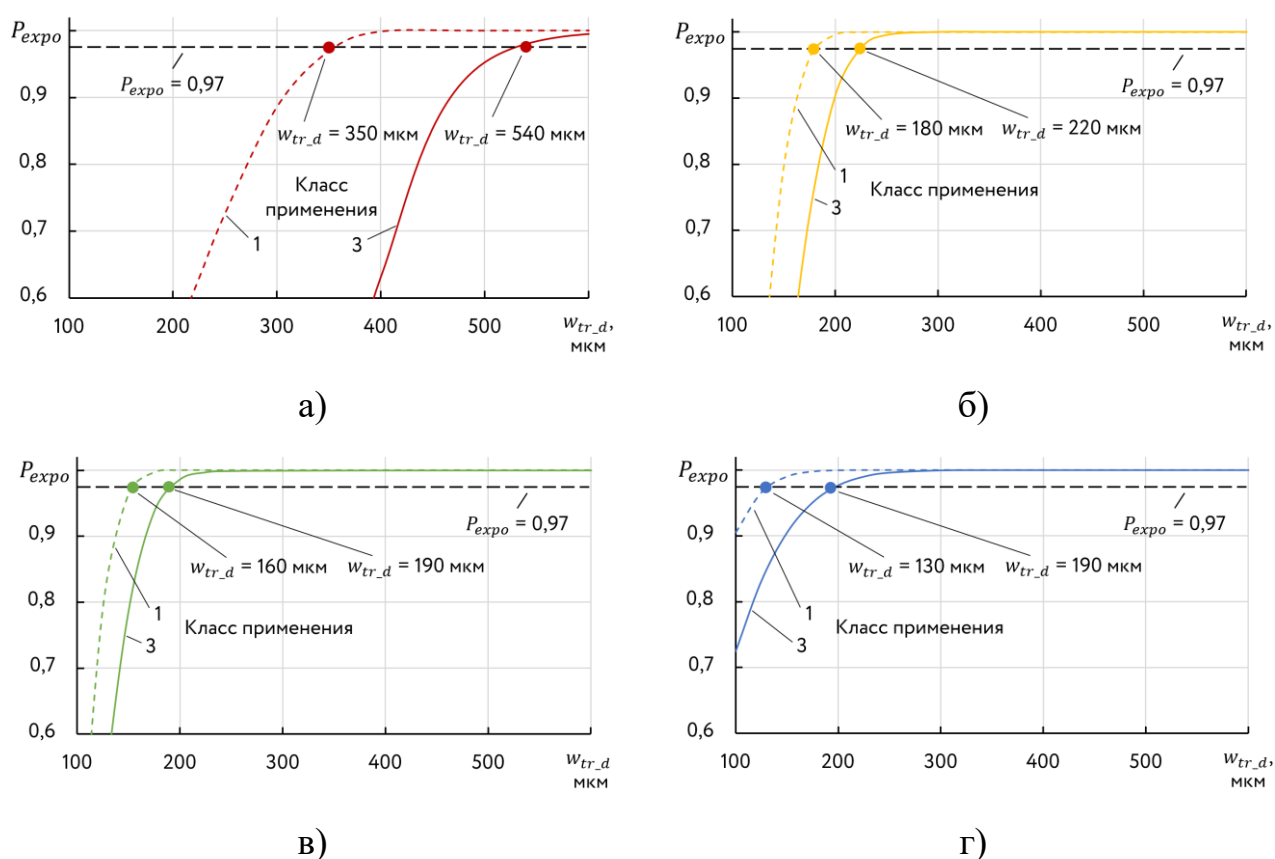


Рисунок 22 — Вероятность  $P_{expo}$  для различных направлений печати проводников: а) вертикальное; б) диагональное; в) горизонтальное; г) все направления с учетом компенсации

Определено, что для вертикальных проводников (Рисунок 22а), несмотря на минимальную величину расхождения между проектируемой и напечатанной

ширинами  $\delta_{pt}$ , паразитная засветка значительно увеличивает ширину изготовленного проводника, что в конечном итоге приводит к худшему результату по сравнению с остальными. Для горизонтальных и диагональных проводников (Рисунок 22б, в) наоборот — уменьшенная ширина проводников на фотошаблоне компенсируется увеличением ширины от паразитной засветки, что увеличивает диапазон возможных для изготовления ширин. В таблице 2 представлены значения ширины проводника для разных направлений печати и классов применения изделия, обеспечивающих заданный уровень вероятности  $P_{expo} = 0,97$ .

Таблица 2 — Ширина проводника  $w_{tr\_d}$ , на которой обеспечивается вероятность бездефектного изготовления  $P_{expo} = 0,97$ , мкм

| Класс применения | Направление печати проводников |              |                |
|------------------|--------------------------------|--------------|----------------|
|                  | Вертикальное                   | Диагональное | Горизонтальное |
| 3                | 540                            | 220          | 190            |
| 1                | 350                            | 180          | 160            |

Таким образом, в текущей реализации процесса низкие параметры точности воспроизведения проводящего рисунка в большей степени обусловлены изменением МО ширины проводника в процессе изготовления, а не неровностью воспроизведения краев проводника, описывающего СКО. Считая МО ширины проводника не случайной величиной, можно компенсировать его изменение в ходе ТПП некоторой величиной  $c(w_{tr\_d})$ , тем самым увеличив вероятность выхода бездефектной заготовки. В качестве критерия оптимизации использовано условие равенства проектируемого значения ширины проводника и его результата изготовления, значение  $c(w_{tr\_d})$  совпадает по величине с  $\delta_{expo}(w_{tr\_d})$ , но имеет обратный знак ( $c(w_{tr\_d}) = -\delta_{expo}(w_{tr\_d})$ ).

Для проверки эффективности компенсации проведен повторный эксперимент, в котором произведено изменение ширины проводников в соответствии с величиной параметра  $c(w_{tr\_d})$ . Эффективность компенсации подтверждается: уменьшением величины  $\delta_{expo}$  на изготовленных тест-купонах (Рисунок 23); совпадением частот  $q$  выхода годных участков для разных направлений печати и уменьшением значения минимальной проектируемой ширины проводника, на которой достигается приемлемый уровень вероятности.

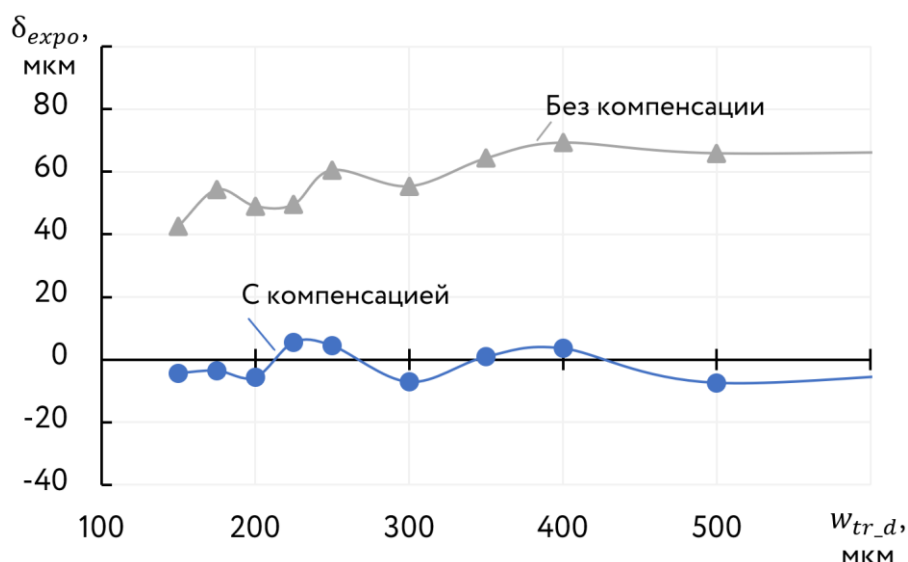


Рисунок 23 — Сравнение экспериментальных результатов величины  $\delta_{expo}$  без компенсации и с компенсацией (вертикальное направление печати)

С учетом внесенной компенсации закон распределения ширины проводника для всех направлений печати имеет параметры  $W_{expo} \in N(w_{tr\_d}, 324)$ , а минимальная воспроизводимая ширина проводника при значении вероятности 0,97 составляет 190 мкм для класса применения 3 и 130 мкм для класса 1 (Рисунок 22г), т. е. введение компенсации в проект ПП позволило уменьшить минимальную воспроизводимую ширину в 2,7 раза на лабораторной производственной линии для изделий класса применения 1 (с 350 мкм до 130 мкм).

Таким образом, с помощью проведенного экспериментального исследования согласно разработанной методике:

- подтверждена согласованность полученных результатов моделирования оценки вероятности выхода годной заготовки на операции фотолитографии и экспериментальных данных;
- на примере лабораторной фотолитографии определены технологические параметры процесса: зависимость параметра искажения размеров проводящего рисунка  $\delta_{expo}$  от проектируемой ширины проводника при различных направлениях его печати; неровность воспроизведения края проводника  $\xi$ ;
- произведена компенсация неслучайной составляющей искажения размеров топологии, вызванной паразитной засветкой в процессе

экспонирования и изменением рисунка при печати, в результате чего достигнуто воспроизведение топологии четвертого класса точности по ГОСТ Р 53429–2009 (ширина проводника и зазора равны 150 мкм) согласно классу применения 1 по IPC–A–600G.

## **2.2 Процесс травления**

Следующим важным этапом в процессе воспроизведения проводящего рисунка химическим путем является травление, основной задачей которого является селективное удаление проводящего слоя с заготовки. Несмотря на то, что значительное влияние на воспроизведение проводников оказывает качество нанесенного на заготовку фоторезистивного или металлорезистивного слоя, процесс травления также существенно влияет на конечный результат.

### **2.2.1 Параметры дефектов для процесса травления**

Анализ влияния процесса травления на результирующее качество заготовки возможен путем рассмотрения поперечного сечения проводника. В большинстве случаев при проектировании ПУ в качестве поперечного сечения проводника применяется идеальный вариант, т. е. прямоугольник (Рисунок 24а). Однако, в сущности, профиль проводника имеет переменную ширину на протяжении его толщины. Причиной тому являются чашевидные дефекты, форму которых определяют характеристики процесса травления, к которым относятся [93,94]: способ переноса раствора на заготовку, ориентация заготовки и струй раствора, давление струй, состав раствора и поддержание его характеристик во времени, наличие перемешивания и т. д. В худшем случае предполагается, что процесс травления изотропен (Рисунок 24б), т. е. скорость травления по всем направлениям одинакова, что характерно для установок погружного травления. В таком случае проводник будет иметь плавное расширение к нижней части. Для струйных установок (Рисунок 24в) скорость травления в глубину выше, чем по поверхности, а отношение этих скоростей и форма профиля зависит от упомянутых выше характеристик процесса.

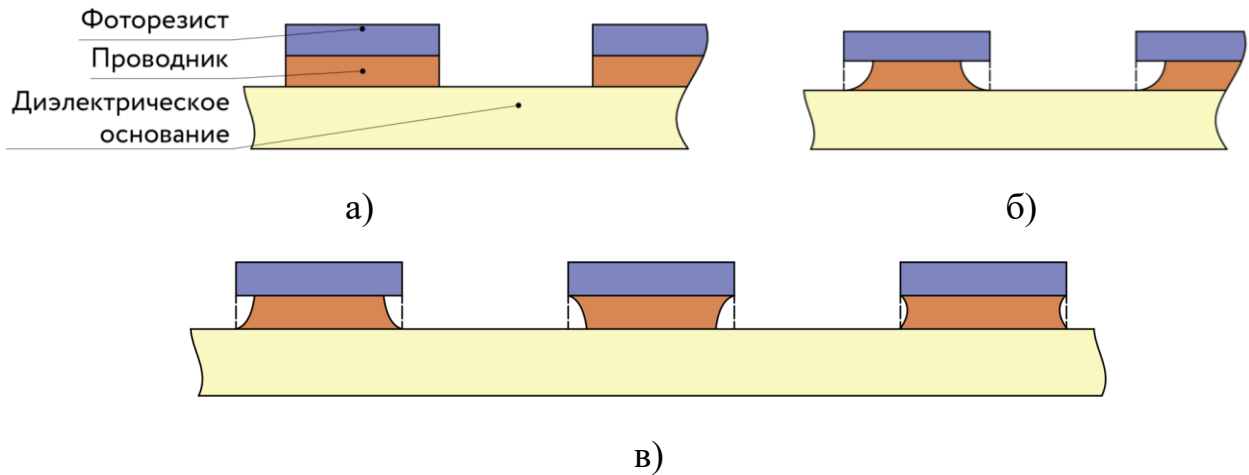


Рисунок 24 — Возможные профили поперечного сечения проводника:  
 а) проектируемый (прямоугольник); б) после погружного травления;  
 в) после струйного травления

Эффективность процесса травления со стороны обеспечения качества изделия можно описать двумя свойствами:

- минимальное изменение профиля поперечного сечения проводника относительно прямоугольной формы, т. е. высокая анизотропность процесса, обеспечивающая высокую скорость травления вглубь проводящего слоя и низкую скорость бокового травления;
- равномерная скорость травления по площади заготовки.

Однако, на данные свойства влияет большое количество параметров (Рисунок 25) [6, 10].

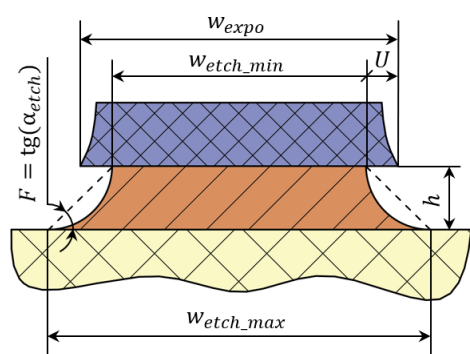


Рисунок 25 — Определение параметров дефектов, возникающих в процессе травления

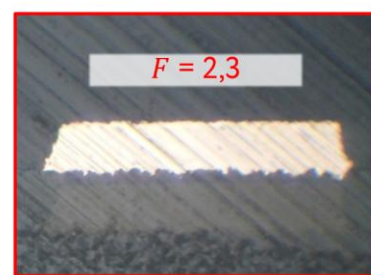
Параметры операции травления можно разделить на три группы:

- 1) параметры травящего раствора, характеризующимся его составом, а также изменением состава в ходе травления — деградацией и компенсирующей ее регенерацией;
- 2) технологические параметры процесса, которые включают в себя: температурный режим, наличие перемешивания раствора, используемый способ переноса раствора на заготовку (струйный или погружной), а также ориентация заготовки в установке (горизонтальная или вертикальная);
- 3) параметры заготовки: площадь стравливаемой меди, разброс размеров элементов проводящего рисунка, толщина фольги и резистивного слоя.

Для описания влияния травления на поперечное сечение проводника использованы две интегральные характеристики, значения которых определяются совокупностью выделенных частных параметров: подтравливание  $U$  и фактор травления  $F$ , которые характеризуют среднее провисание фоторезиста и среднее сужение проводника на единицу толщины соответственно [5]. Таким образом, для увеличения качества процесса травления необходимо устремить к нулю подтравливание  $U$  и максимизировать фактор травления  $F$  (Рисунок 26).



а)

Промышленная  
установкаЛабораторная  
установка

б)

Рисунок 26 — Параметры операции травления: а) схема; б) факторы травления различных установок, полученные по микрошлифам поперечного сечения проводника на тест-купоне

Подтравливание  $U$  и фактор травления  $F$  определяются формулами (12) и (13), соответственно:

$$U = \frac{w_{expo} - w_{etch\_min}}{2}, \quad (12)$$

$$F = \frac{2h}{w_{etch\_max} - w_{etch\_min}} = \text{tg}(\alpha_{etch}), \quad (13)$$

где:

- $U$  — подтравливание;
- $F$  — фактор травления;
- $w_{expo}$  — ширина фоторезиста, накрывающего проводник (для примера рассматривается субтрактивный процесс, использующий негативный сухой пленочный фоторезист);
- $w_{etch\_min}$  — минимальная ширина проводника после травления;
- $w_{etch\_max}$  — максимальная ширина проводника после травления;
- $h$  — толщина проводящего слоя.

Для определения площади поперечного сечения реального проводника (Рисунок 27б) необходимо знать закон изменения толщины проводника в зависимости от его ширины  $\delta_h(x)$ .

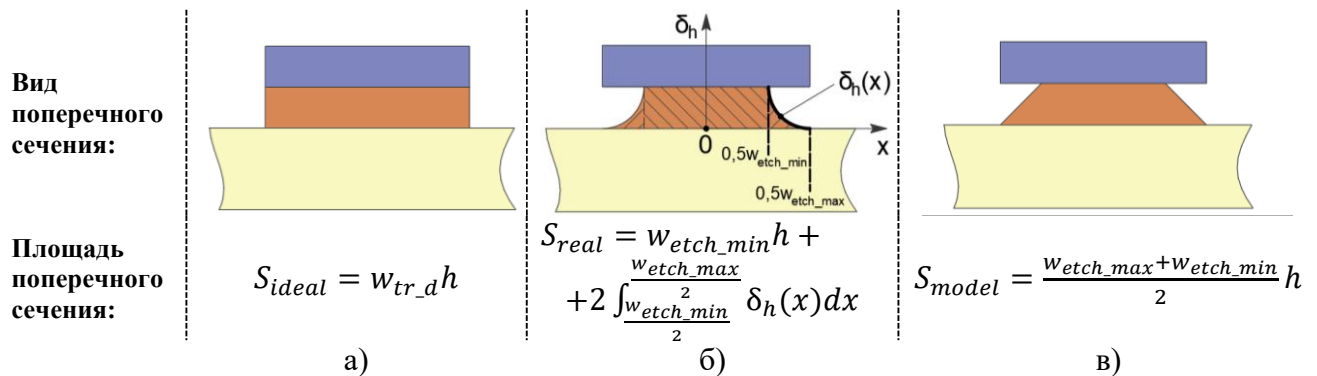


Рисунок 27 — Площадь поперечного сечения проводника: а) идеальный случай; б) реальный случай; в) упрощенный случай

Учитывая сложность геометрии профиля реального проводника, его края аппроксимированы прямой, образуя равнобокую трапецию (Рисунок 27в). Поскольку такая форма является лишь одним из возможных вариантов, и в действительности фигура проводника зависит главным образом от типа процесса травления, поэтому в качестве оснований трапеции использованы значения максимальной и минимальной ширин проводника. Объединив формулы (12) и (13),

получена зависимость площади поперечного сечения от параметров процесса травления (14):

$$S_{model}(w_{expo}, h, U, F) = \frac{w_{etch\_min} + w_{etch\_max}}{2} h = w_{expo} h - 2Uh + \frac{h^2}{F}. \quad (14)$$

Процесс травления можно считать оптимальным, если после травления максимальная ширина проводника равна ширине фоторезиста, накрывающего его, что гарантирует соответствие проектируемым значениям ширины проводников и зазоров между ними (Рисунок 28). Также это условие можно описать параметром величины травления [78], представляющим из себя отношение ширины фоторезиста к максимальной ширине проводника. В таком случае это отношение должно быть равно единице ( $E = \frac{w_{expo}}{w_{etch\_max}} = 1$ ). Однако, нестабильность параметров процесса (изменение состава раствора, износ оборудования и т. д.) влечет за собой появление проводников, не удовлетворяющих данному требованию, т. е. проводников с большей (неотравленные) и меньшей (перетравленные) шириной относительно проектируемой.

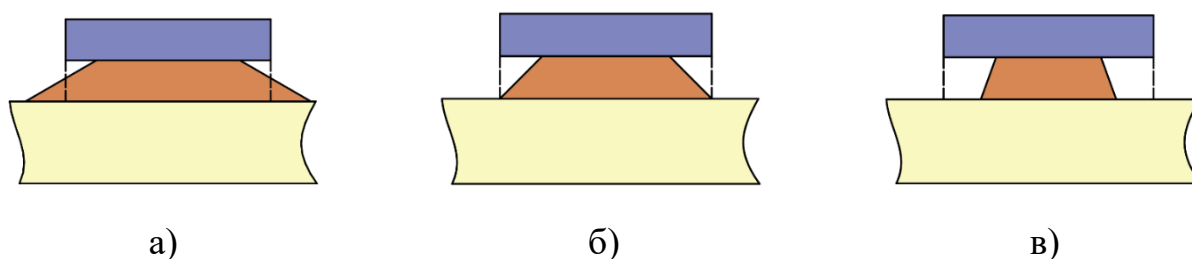


Рисунок 28 — Проводники после травления: а) неотравленный ( $E < 1$ ); б) оптимальный ( $E = 1$ ) в) перетравленный ( $E > 1$ )

Получение перетравленных проводников предпочтительнее, так как важнее сохранение заложенной на этапе проектирования величины зазора для предотвращения коротких замыканий. Поэтому нельзя рассматривать в качестве меры для уменьшения влияния подтравки увеличение ширины фоторезиста  $w_{exp}$  над проводниками, так как это действие также уменьшит величину зазора. В настоящее время на производстве ПП в ТП закладывается величина травления  $E$  от 1,1 до 1,15.



## 2.2.2 Влияние параметров процесса травления на качество печатной платы

В качестве исходных данных для исследования процесса травления рассмотрены экспериментально полученные результаты травления заготовок с толщиной медной фольги 35 мкм в хлориде двухвалентной меди [85]. Проектируемая ширина проводников и зазоров — 75 мкм, толщина фоторезиста — 25 мкм.

Таблица 3 — Параметры травления

| Время травления, с | Минимальная ширина проводника $w_{etch\ min}$ , мкм | Максимальная ширина проводника, $w_{etch\ max}$ , мкм | Подтравливание $U$ , мкм | Фактор травления $F$ | Величина травления $E$ |
|--------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|
| 90                 | 72,5                                                | 150,3                                                 | 1,3                      | 0,9                  | 0,5                    |
| 110                | 60                                                  | 100                                                   | 7,5                      | 1,75                 | 0,75                   |
| 125                | 52,5                                                | 82,5                                                  | 11                       | 2,33                 | 0,9                    |
| 140                | 48,8                                                | 75                                                    | 13                       | 2,67                 | 1,0                    |
| 165                | 37,5                                                | 60                                                    | 19                       | 3,11                 | 1,25                   |

Считая процесс травления оптимальным ( $E = 1$ ), возможно исключить один из параметров травления для нахождения площади поперечного сечения проводника: либо подтравливание  $U$ , либо фактор травления  $F$ . В таком случае, подтравливание и фактор травления связаны соотношением (15), а формула для определения площади поперечного сечения преобразуется к виду (16):

$$U = \frac{h}{F}, \quad (15)$$

$$S_{model}(w_{expo}, h, F) = \left(w_{expo} - \frac{h}{F}\right) h. \quad (16)$$

Для формирования критерия качества, накладываемого на проводящий рисунок использовано ограничение: согласно международному стандарту IPC-6012В п.3.5.3 [71] допускается уменьшение площади поперечного сечения проводника на 20 % для ПП третьего класса применения и 30 % для плат второго и первого класса применения. Тогда, для оценки качества заготовки после травления справедливо использование функции  $Q_{etch}$  (17).

$$Q_{etch}(w_{expo}, h, F) = \frac{S_{model}(w_{expo}, h, F)}{S_{ideal}(w_{expo}, h)} = 1 - \frac{h}{w_{expo}F}. \quad (17)$$

Если  $Q_{etch} > 0,8$  для третьего класса применения или  $Q_{etch} > 0,7$  для второго и первого классов, то проводник можно считать годным, в противном случае — проводник дефектный (Рисунок 29).

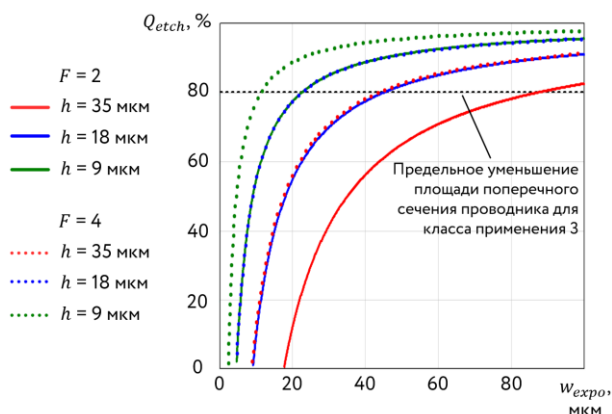


Рисунок 29 — Зависимость функции качества  $Q_{etch}$  от ширины фоторезиста  $w_{expo}$ , накрывающего проводник, при разных значениях фактора травления  $F$  и толщины фольги

Полученное выражение (17) позволяет оценить минимальную ширину проводника, которую возможно получить без дефекта с помощью конкретного процесса травления, а также определяет эквивалентность влияния фактора травления и толщины фольги на результирующее качество заготовки (увеличение фактора травления  $F$  в  $n$  раз эквивалентно уменьшению толщины фольги  $h$  в  $n$  раз).

Для определения ширины проводника  $w_{expo}$ , которую возможно изготовить без дефектов, можно использовать условие (18), в котором параметр  $k$  определяет максимально допустимое уменьшение исследуемой величины, т. е. для данного случая — площади поперечного сечения ( $0 \leq k \leq 1$ ):

$$S_{model}(w_{expo}, h, F) = (1 - k)S_{ideal}(w_{expo}, h). \quad (18)$$

Тогда для проводников третьего класса применения ( $k = 0,2$ ) функция, определяющая минимально возможную ширину проводника, примет вид (19), с помощью которого можно построить графики зависимости минимальной ширины проводника от толщины фольги и фактора травления (Рисунок 30), определяющие

зависимость необходимых значений конструктивных параметров заготовки от технологических возможностей производства.

$$w_{expo} = 5 \frac{h}{F} = 5U. \quad (19)$$

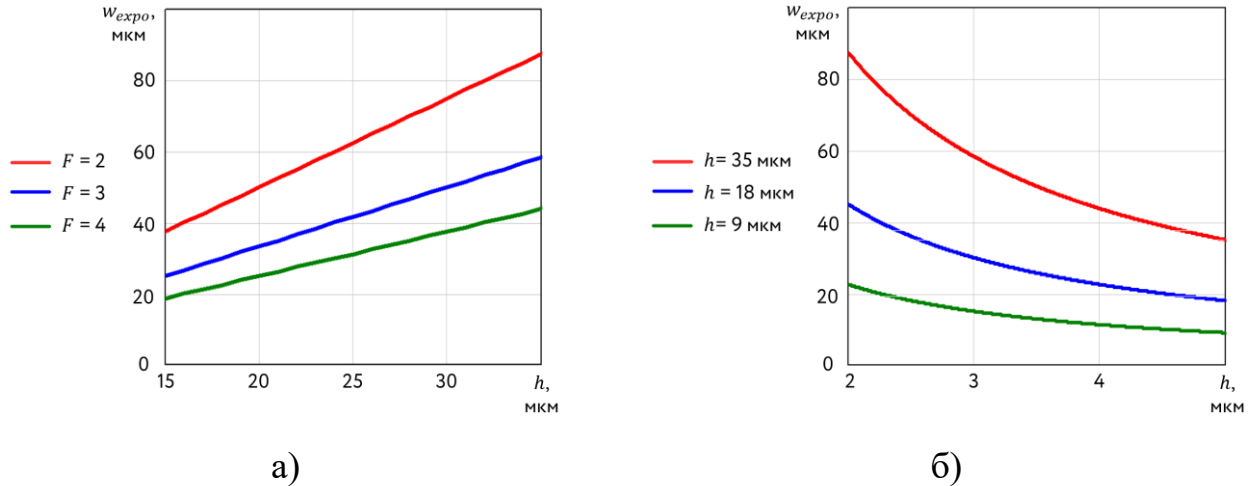


Рисунок 30 — Графики зависимости минимально возможной ширины проводника от: а) толщины фольги; б) фактора травления

Полученные результаты можно использовать лишь для приблизительной оценки возможности изготовления печатной платы с заданной шириной проводников, так как: полученная модель не учитывает погрешности, которые возникают в процессе изготовления, а также действительное значение площади поперечного сечения будет меньше из-за отличий между формами моделируемого и реального проводников. Поэтому возникает потребность в формировании обобщенной вероятностной модели, описывающей совместное влияние процесса фотолитографии и травления.

### 2.2.3 Модель оценки вероятности выхода годной заготовки для процессов фотолитографии и травления

Аналогично процессу фотолитографии влияние процесса травления можно описать законом распределения ширины проводника после соответствующей ТО. Поскольку поперечное сечение проводника имеет сложный профиль, то в качестве исследуемой ширины выбрано максимальное значение ширины проводника в профиле, как наиболее важная с точки зрения производства величина.

Также справедливо предположение, что в процессе травления происходит искажение размеров проводящего рисунка  $\delta_{etch}$ , которое может быть выражено из формул (12), (13) и определяется выражением (20):

$$W_{etch} = W_{expo} + \delta_{etch} = W_{expo} + 2 \left( U - \frac{h}{F} \right) \Rightarrow \delta_{etch} = 2 \left( U - \frac{h}{F} \right). \quad (20)$$

Соответственно величине неровности края проводника для процесса фотолитографии  $\xi$ , привносимый операцией травления разброс ширины проводника определяется величиной подтравливания  $U$ . Поскольку величина подтравливания  $U$  задает утонение для одной стороны проводника, то для всего проводника СКО пропорционально  $\sqrt{2}U$  ( $\sigma_{etch} \sim \sqrt{2}U$ ), которое удобно выразить через фактор травления  $F$  при условии  $E = 1$ :  $U = \frac{h}{F}$ . Тогда, обособленное влияние процесса травления на максимальную ширину проводника может быть описано законом:  $W_{etch} \in N \left( W_{expo} + \delta_{etch}, 2 \frac{h^2}{F^2} \right)$ .

Поскольку  $W_{etch}$  как случайная величина зависит от ширины накрывающего проводник фоторезиста  $W_{expo}$ , которая также является случайной величиной, то имеет место составное распределение. Тогда закон распределения, учитывающий изменение ширины проводника в процессе фотолитографии и травления  $W_{route}$  представляет из себя нормальное распределение [95], характеристики которого определяются через формулы полного математического ожидания (21) и дисперсии (22):

$$M[W_{route}] = M \left[ M[W_{etch}|W_{expo}] \right] = w_{tr\_d} + \delta_{expo} + \delta_{etch}, \quad (21)$$

$$D[W_{route}] = M \left[ D[W_{etch}|W_{expo}] \right] + D \left[ M[W_{etch}|W_{expo}] \right] = 2 \left( \frac{h^2}{F^2} + \xi^2 \right), \quad (22)$$

где:

- $M[W_{route}]$  — математическое ожидание от величины  $W_{route}$ ;
- $M[W_{etch}|W_{expo}]$  — условное математическое ожидание величины  $W_{etch}$  относительно величины  $W_{expo}$ ;
- $D[W_{route}]$  — дисперсия от величины  $W_{route}$ .

Закон распределения величины  $W_{route}$  имеет вид (23):

$$W_{route} \in N\left(w_{tr_d} + \delta_{expo} + \delta_{etch}, 2\left(\frac{h^2}{F^2} + \xi^2\right)\right). \quad (23)$$

С учетом закона распределения (23), вероятность получения годной заготовки после операции фотолитографии и травления при сформированных ранее ограничениях на ширину проводника будет определяться формулой (24):

$$P_{route} = \Phi\left(\frac{k_{max}w_{tr_d} - \delta_{expo} - \delta_{etch}}{\sqrt{2(\sigma_{etch}^2 + \xi^2)}}\right) - \Phi\left(\frac{-k_{min}w_{tr_d} - \delta_{expo} - \delta_{etch}}{\sqrt{2(\sigma_{etch}^2 + \xi^2)}}\right). \quad (24)$$

Модель  $P_{route}$  (24) определяет взаимосвязь между вероятностью изготовления проводников на ПП в соответствии с определенными в стандартах [70] требованиями к проводящему рисунку, с учетом параметров:

1) параметры конструкции печатной платы:

—  $w_{tr_d}$  — проектируемая ширина проводника и зазора между проводниками ( $w_{tr_d} = w_{clr_d}$ );

—  $h$  — толщина медной фольги;

2) параметры технологических операций:

—  $\delta_{expo}$  — искажение размеров проводящего рисунка (параметр систематической погрешности на операции фотолитографии);

—  $\xi$  — неровность воспроизведения края проводника (параметр случайной погрешности операции фотолитографии);

—  $\delta_{etch}(U, h, F)$  — искажение размеров проводящего рисунка на операции травления (параметр систематической погрешности операции травления);

—  $\sigma_{etch}(h, F)$  — параметр случайной погрешности на операции травления;

—  $F$  — фактор травления;

—  $U$  — подтравливание;

3) требования стандартов приемки, выраженные в виде коэффициентов  $k_{min}$  и  $k_{max}$ , которое определяют допустимое изменение ширины проводника и зазора между проводниками в зависимости от класса применения.

С помощью модели (24) построено семейство кривых (Рисунок 31), отображающих зависимость вероятности получения проводящего рисунка без дефектов от проектируемой ширины проводника при варьировании: толщины медной фольги  $h \in \{18; 35\}$  мкм; неровности воспроизведения края проводника  $\xi \in \{4; 14\}$  мкм, фактора травления  $F \in \{2; 5\}$ . Худшие параметры операций  $\xi = 14$  мкм и  $F = 2$  соответствуют лабораторным условиям производства, а лучшие:  $\xi = 4$  мкм и  $F = 5$  — производственным. Для простоты анализа предполагается, что технологические операции не искажают размеры проводящего рисунка:  $\delta_{expo} = \delta_{etch} = 0$ , а требуемый класс применения изделия — 3.

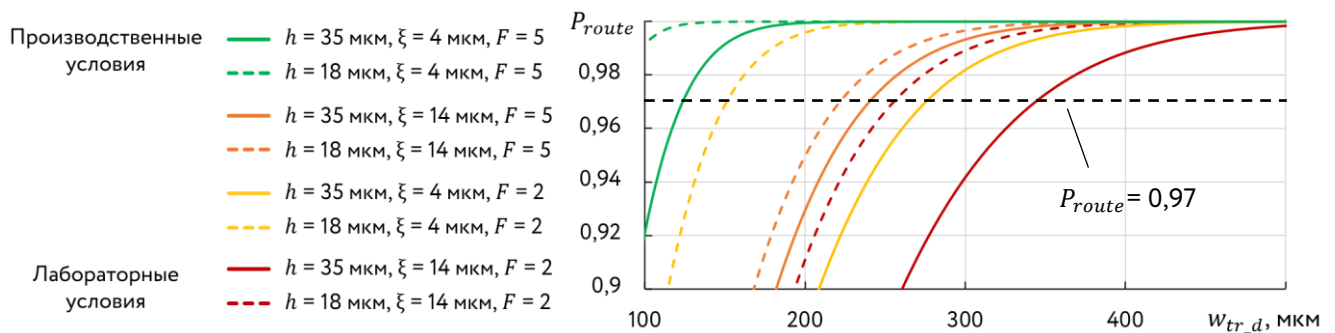


Рисунок 31 — Вероятность получения проводящего рисунка без дефектов в зависимости от проектируемой ширины проводника при разных условиях производства

В целом, полученные результаты согласуются с полученной ранее функцией качества  $Q_{etch}$  (17). Построенные кривые позволяют получить информацию о целесообразности изготовления ПП с помощью того или иного технологического процесса:

- 1) сложно ( $P_{route} < 0,97$ ) без дефектов изготовить печатную плату с толщиной меди 35 мкм и дорожками меньше 350 мкм (Рисунок 31, красная сплошная линия), на производстве в лабораторных условиях, в то время как для производственных условий (Рисунок 31, зеленая сплошная линия) достижима ширина проводника 125 мкм;
- 2) уменьшение толщины медной фольги значительно увеличивает вероятность выхода годных для производственного процесса с низким фактором травления (Рисунок 31, сравнение сплошных и пунктирных линий красного и желтого цветов);

3) рассматривая возможности по улучшению процесса относительно лабораторных условий, можно увидеть, что обновление процесса фотолитографии позволит добиться значительно более высокого качества на тонких слоях меди (Рисунок 31, желтая и оранжевая пунктирные линии), однако на толстых слоях наблюдается противоположный эффект (Рисунок 31, желтая и оранжевая сплошные линии) и модификация процесса травления более предпочтительна.

Таким образом, построенная модель расчета  $P_{route}$  (24) отражает зависимость вероятности выхода бездефектной заготовки печатной платы от параметров конструкции и технологического процесса, используемого для ее изготовления и включающего фотолитографию и травление. В качестве преимуществ модели можно выделить ее простоту использования и возможность дополнения с помощью как теоретических, так и экспериментальных зависимостей. Поэтому модель удобно использовать, как базу для дальнейшего развития и уточнения. В то же время, модель можно упростить, исключив не нуждающиеся в рассмотрении параметры. Использование при описании модели элементов теории вероятностей позволяет не только агрегировать влияние различных факторов, но и предоставляет возможность построения связей между ними.

## 2.3 Выводы по главе

В главе описан процесс создания и исследования модели оценки вероятности изготовления заготовки ПП для операций воспроизведения проводящего рисунка: фотолитографии и травления:

- произведены анализ технологий экспонирования и декомпозиция процесса фотолитографии на этапы, на основе которых определены возможные дефекты и параметры для их описания;
- определены требования к приемке ПП со стороны проводящего рисунка;
- сформирована математическая модель, определяющая влияние конструктивных параметров проекта ПП (проектируемой ширины

проводника и зазора), технологических параметров ее производства (искажение размеров рисунка и неровность воспроизведения края проводника), а также требований к качеству изделия (класс применения изделия) на вероятность выхода годной заготовки;

- разработана методика экспериментального определения параметров операции фотолитографии, которая на основе компьютерного анализа изображений тестовых образцов позволяет сформировать корректирующие воздействия в проекте ПП для минимизации количества производственных дефектов;
- произведена экспериментальная апробация разработанной методики на лабораторной производственной линии производства печатных плат, в ходе которой подтверждена адекватность разработанной модели оценки вероятности выхода годных на этапе фотолитографии; сформированные корректирующие воздействия позволили в 2,7 раза уменьшить топологические нормы по ширине проводника и зазора между проводниками;
- исследован процесс травления: определены параметры операции, влияющие на возникновение дефектов (фактор травления и подтравливание), и расширены требования приемки;
- сформирована модель, позволяющая приближенно оценить влияние параметров процесса травления на качество выхода заготовки;
- разработана модель вероятности выхода заготовки, соответствующей требованиям приемки по критериям допустимой ширины проводника и зазора между проводниками, для операций фотолитографии и травления.

Представленные в главе результаты имеют следующие возможности для развития: добавление в модель  $P_{route}$  (24) влияния длины проводников, поскольку с ее увеличением вероятность возникновения локальных дефектов увеличивается; уточнение результатов моделирования на основе применения общих физических моделей процессов, описывающих взаимосвязи между конструктивными и технологическими параметрами.



### **Глава 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫХОДА ГОДНОЙ КОНТАКТНОЙ ПЛОЩАДКИ ДЛЯ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ**

#### **3.1 Требования к контактным площадкам**

Производство современного электронного оборудования неразрывно связано с современными тенденциями развития ПП, количество ПП высокого класса точности постоянно растёт. Соответственно, плотность размещения электрических цепей на проводящем рисунке становится выше, что приводит: к уменьшению размера контактных площадок (КП); уменьшению ширины проводников и зазоров; увеличению количества слоёв; использованию многоуровневых соединений; использованию пространственных структур. Электрические переходы между слоями, реализуемые при помощи переходных отверстий, также постоянно уменьшаются; воспроизводятся они при помощи сверления через изоляционные слои и осаждения меди по периметру для создания проводимости. Увеличение количества слоёв приводит к проблемам точности позиционирования и соблюдения допусков на гарантийный пояс.

Основным препятствием на пути увеличения плотности межсоединений являются КП большого диаметра, так как они уменьшают трассировочное пространство между отверстиями. Чем больше погрешности пространственного совмещения элементов межсоединений, тем вынужденно больше размер КП, чтобы обеспечить уверенное попадание в них сверла при получении переходных отверстий [96, 97]. Поэтому размер пояса вокруг просверленных отверстий должен быть достаточным для того, чтобы обеспечить выход бездефектной заготовки при возможных смещениях элементов межсоединений в слоях относительно друг друга, а также не допустить выхода просверленного отверстия за пределы КП [98].

В зарубежных стандартах, содержащих технические требования к качеству и приемке жестких ПП, IPC-6012B [71] и IPC-A-600G [70] и соответствующем им отечественном ГОСТ Р 55693-2013 [73], качество КП определено через ее минимальный гарантийный пояс, т. е. минимальное расстояние от края отверстия до края контактной площадки. Также стандарты группируют требования к гарантийному поясу в зависимости от характеристики отверстия: сквозное металлизированное на внешнем слое, сквозное металлизированное на внутреннем слое и неметаллизированное отверстие на внешнем слое. Ввиду незначительных различий между отверстиями различных характеристик, для определенности в дальнейшем использованы требования к гарантийному поясу КП сквозных металлизированных отверстий на внешнем слое:

- для ПП 3-го класса применения допускается смещение центра отверстия относительно центра КП, необходимо наличие гарантийного пояса не менее 50 мкм;
- для ПП 2-го класса применения допускается выход отверстия за пределы контактной площадки, разрыв КП не более 90°;
- для ПП 1-го класса применения допускается выход отверстия за пределы контактной площадки, разрыв КП не более 180°.

Также, аналогично требованиям, накладываемым на минимальную ширину проводника, допускается уменьшение диаметра КП не более 20 % для 3-го и 2-го классов применения и 30 % — для 1-го.

Предъявленные ограничения геометрически могут быть представлены в виде области допустимого смещения центра отверстия относительно центра КП (Рисунок 32). Дальнейшее рассмотрение ограничено КП круглой формы, как наиболее используемыми в процессе трассировки ПП. На рисунке 32:

- $D_{via}, R_{via}$  — диаметр и радиус КП переходного или монтажного отверстия;
- $D_{drill}, R_{drill}$  — диаметр и радиус просверленного отверстия;
- $D_{hole}, R_{hole}$  — диаметр и радиус отверстия с учетом слоя металлизации;
- $Z_3, Z_2, Z_1$  — области допустимого смещения центра отверстия относительно центра КП для соответствующих классов назначения ПП; в силу симметрии

КП относительно центров  $O_3, O_2, O_1$ , области допустимого смещения центра отверстия — окружности с диаметрами  $D_{C3}, D_{C2}, D_{C1}$  и радиусами  $R_{C3}, R_{C2}, R_{C1}$ .

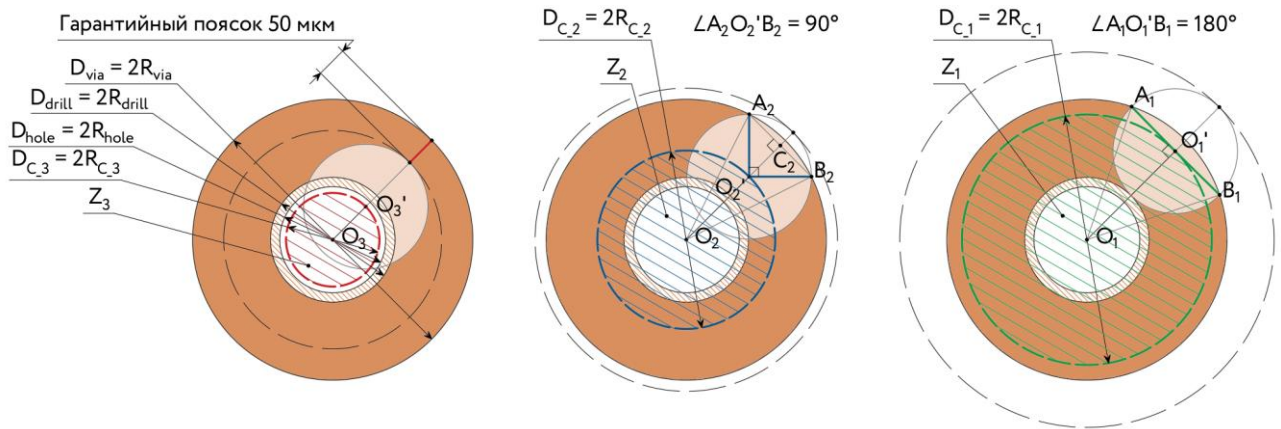


Рисунок 32 — Геометрическое определение области допустимого смещения центра отверстия относительно центра контактной площадки для разных классов назначения печатной платы

Стоит отметить, что даже в случае наличия металлизации в отверстии, размер гарантийного пояса определяется минимальным расстоянием от края просверленного отверстия, а не от металлизированного края. Поскольку для соответствия классу применения 3 необходимо наличие гарантийного пояса не менее 50 мкм, радиус области допустимого смещения центра отверстия относительно центра контактной площадки  $R_{C3}$  определяется выражением (25):

$$R_{C3} = O_3O'_3 = R_{via} - (R_{drill} + 50 \text{ мкм}). \quad (25)$$

Соответствие ПП классу применения 2 допускает выход отверстия за пределы КП при выполнении условия, что дуга окружности отверстия, выходящая за пределы контактной площадки, не больше  $90^\circ$ . Для определения максимального смещения центра отверстия  $R_{C2}$  рассмотрен треугольник  $O'_2A_2B_2$ : по требованию  $\angle A_2O'_2B_2$  — прямой, а также его стороны  $O'_2A_2 = O'_2B_2 = R_{drill}$ , тогда участки  $O'_2C_2 = A_2C_2 = \frac{R_{drill}}{\sqrt{2}}$ , а углы  $\angle A_2C_2O'_2$  и  $\angle A_2C_2O_2$  — прямые. Затем рассмотрен треугольник  $O_2A_2C_2$ : так как  $\angle A_2C_2O_2$  — прямой, то максимальное смещение центра отверстия  $R_{C3}$  определяется по формуле (26):

$$R_{C_3} = O_2 O'_2 = \sqrt{O_2 A_2^2 - A_2 C_2^2} - O'_2 C_2 = \sqrt{R_{via}^2 - \frac{R_{drill}^2}{2}} - \frac{R_{drill}}{\sqrt{2}}. \quad (26)$$

Требования класса применения 1 похожи на требования класса 2, но допускают образование дуги не больше  $180^\circ$ . Аналогично предыдущим случаям определено максимальное смещение центра отверстия относительно центра КП. В треугольнике  $O_1 A_1 B_1$   $O_1 A_1 = O_1 B_1 = R_{via}$  и  $A_1 O'_1 = B_1 O'_1 = R_{drill}$ , тогда  $O_1 O'_1$  — высота треугольника  $O_1 A_1 B_1$  и  $\angle A_1 O'_1 O_1$  — прямой. Следовательно, максимальное смещение центра отверстия  $R_{C1}$  определяется по формуле (27):

$$R_{C1} = O_1 O'_1 = \sqrt{O_1 A_1^2 - A_1 O'_1^2} = \sqrt{R_{via}^2 - R_{drill}^2}. \quad (27)$$

Таким образом, выражения (25)–(27), определяют влияние конструктивных параметров ПП: размеров контактной площадки и просверленного отверстия на допуск операции сверления, выраженный в виде области допустимого смещения центра отверстия относительно центра КП.

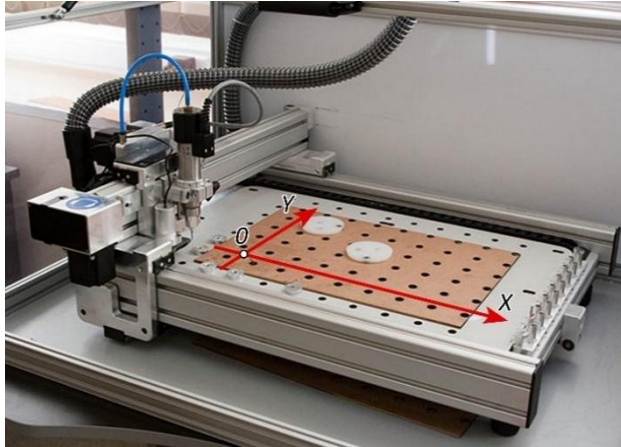
### 3.2 Математическая модель оценки вероятности выхода годной нефункциональной контактной площадки

Для процесса сверления, который преимущественно осуществляется на комплексах с числовым программным управлением (ЧПУ) (Рисунок 33а), справедливо вероятностное представление координаты центра отверстия как случайной величины, описываемой законом распределения на плоскости. Определение соответствующего закона распределения возможно с помощью введения дополнительных допущений (Рисунок 33б):

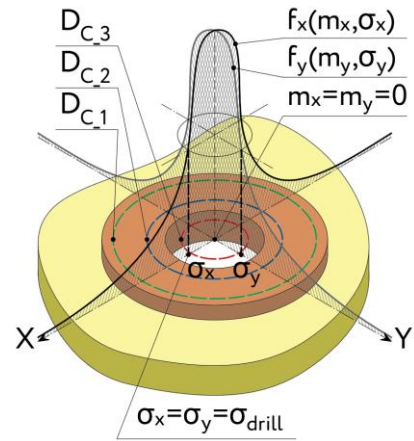
- закон распределения содержит две независимые составляющие  $X$  и  $Y$ , каждая из которых характеризует позицию по одной из оси координат станка с ЧПУ (координатные оси перпендикулярны, Рисунок 33а);
- составляющие  $X$  и  $Y$  подчинены нормальному закону распределения (с функциями плотности  $f_X, f_Y$ ), что справедливо согласно центральной

предельной теореме, поскольку величины  $X$  и  $Y$  зависят от большого количества слабо связанных между собой случайных величин [84];

- математические ожидания  $m_x, m_y$  случайных величин  $X$  и  $Y$  равны нулю и совпадают с центром контактной площадки ( $m_x = m_y = 0$ );
- среднеквадратические отклонения  $\sigma_x, \sigma_y$  случайных величин  $X$  и  $Y$  равны между собой ( $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_{drill}$ ).



а)



б)

Рисунок 33 — Определение: а) координатное поле типового станка для сверления на примере комплекса Bungard CCD; б) вероятностные характеристики попадания в контактную площадку при сверлении

С учетом принятых допущений, закон распределения положения центра отверстия вырождается в закон распределения смещения центра отверстия относительно заложенного при проектировании положения и представляет из себя закон распределения Рэлея [99] с функцией плотности  $f_{XY}$  (28):

$$f_{XY}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{drill}^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_{drill}^2}}. \quad (28)$$

Тогда, вероятность выхода годной КП  $P_{via\_nf}$  — вероятность попадания центра просверленного отверстия ( $O_{drill}$ ) в область допустимого смещения центра КП  $Z_i$ , где  $i$  — класс применения печатной платы (29):

$$P_{via\_nf} = P(O_{drill} \in Z_i) = \frac{1}{2\pi\sigma_{drill}^2} \iint_{(Z_i)} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_{drill}^2}} dx dy. \quad (29)$$

Стоит отметить, что величина  $P_{via\_nf}$  характеризует вероятность изготовления годной нефункциональной КП — КП, к которой не подключены проводники [83]. Такой частный случай характерен для МПП, в которых межслойные переходы выполнены в виде сквозных металлизированных отверстий — с увеличением количества межсоединений растет количество слоев и переходных отверстий, но для сигнальных линий связи в переходном отверстии редко задействуется больше двух контактных площадок, которые непосредственно обеспечивают электрический контакт одного слоя с другим. Остальные контактные площадки, в свою очередь, будут нефункциональны.

Поскольку области  $Z_i$  представляют собой окружности, то целесообразно перейти от прямоугольной системы координат к полярной (30). Якобиан преобразования равен  $r$ . Тогда функция плотности положения центра отверстия и вероятность  $P_{via\_nf}$  будут определяться по формулам (31) и (32) соответственно:

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos(\varphi) \\ y = r \cdot \sin(\varphi) \end{cases} \quad (30)$$

$$f(r) = \frac{1}{2\pi\sigma_{drill}^2} e^{\frac{-r^2}{2\sigma_{drill}^2}}, \quad (31)$$

$$P_{via\_nf} = \frac{1}{2\pi\sigma_{drill}^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{Ci}} r \cdot e^{\frac{-r^2}{2\sigma_{drill}^2}} dr d\varphi = 1 - e^{\frac{-R_{Ci}^2}{2\sigma_{drill}^2}}. \quad (32)$$

Используя выражение (32), получены кривые, которые отражают зависимость вероятности выхода годной КП от ее диаметра отверстия и точности сверлильного станка при варьировании диаметра просверленного отверстия (Рисунок 34). Под точностью станка подразумевается максимальное значение отклонения координаты просверленного отверстия, относительно заложенного при проектировании, по одной оси, которое приближенно может быть оценено величиной  $3\sigma_{drill}$ . В качестве исходных данных для моделирования выбраны технологические возможности предприятия «Резонит» [46]: диаметр КП  $D_{via}$  равен 0,4 мм, диаметр отверстия  $D_{drill}$  равен 0,2 мм; СКО станка  $\sigma_{drill}$  принято равным

10 мкм, что соответствует точности современных станков с ЧПУ для сверления ПП [100].

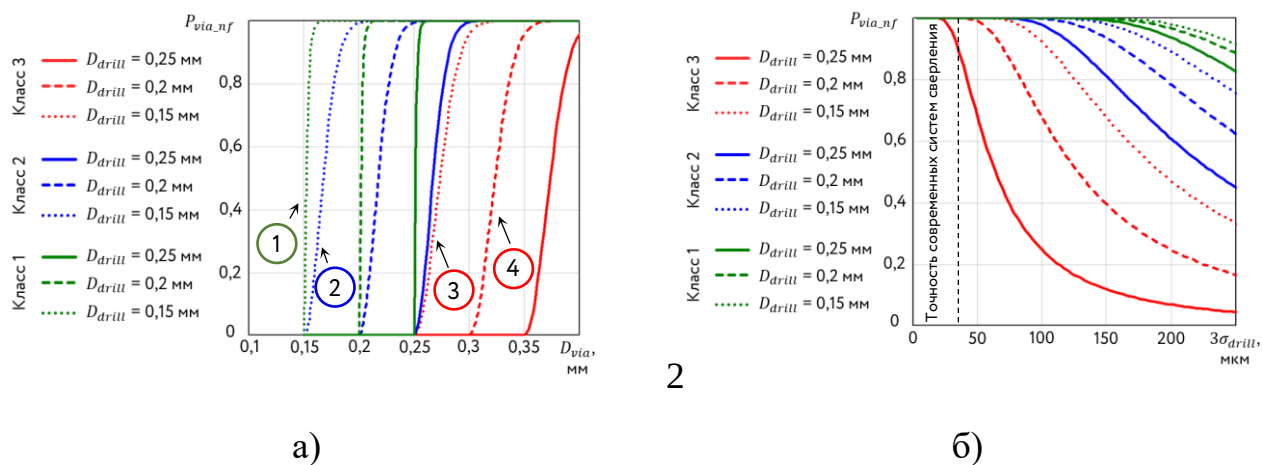


Рисунок 34 — Кривые вероятности выхода годной нефункциональной контактной площадки  $P_{via\_nf}$  при разных требуемых классах применения и диаметрах отверстия  $D_{drill}$ : а) зависимость от диаметра контактной площадки  $D_{via}$  ( $\sigma_{drill} = 10$  мкм), б) зависимость от точности станка ( $D_{via} = 0,4$  мм)

На основе анализа кривых зависимости вероятности выхода годной нефункциональной КП  $P_{via\_nf}$  от ее диаметра можно оценить влияние каждого параметра модели на форму результирующей зависимости:

- класс применения влияет как на скорость роста функции вероятности (Рисунок 34а, кривые 1 и 2), так и на ее горизонтальное смещение (Рисунок 34а, кривые 2 и 3), обусловленное требованием к наличию гарантийного пояса 50 мкм;
- размер просверленного отверстия влияет только на горизонтальное смещение функции вероятности (Рисунок 34а, кривые 3 и 4), т. е. размер гарантийного пояса одинаков при разных диаметрах отверстий для одного класса применения.

Анализ зависимости вероятности выхода годной нефункциональной КП  $P_{via\_nf}$  показал, что смягчение требований к ПП, выраженное в определении более низкого класса применения ПП, в значительной степени позволяет снизить требования к точности обрабатывающего станка, при этом влияние класса применения для современных систем сверления (точность от 30 мкм и выше) незначительно.

Однако, область применения модели (32) и построенных с ее помощью зависимостей значительно ограничена областью нефункциональных КП и требует расширения, поскольку в практическом плане наибольший интерес представляет определение качества контактных площадок, к которым подключены проводники.

### **3.3 Математическая модель оценки вероятности выхода годной контактной площадки с подключенным проводником**

Подключение проводника к КП расширяет требования, накладываемые на область их соединения. На основании стандартов IPC-6012B [70], ГОСТ Р 55693-2013 [73] и IPC-A-600G [70] сформированы общие требования к области соединения проводника и КП для КП сквозного металлизированного отверстия на внешнем слое: для всех классов применения соединение КП с проводником должно быть не менее проектируемой ширины проводника с учетом допустимого с уменьшения ширины (20 % для 3-го и 2-го классов применения и 30 % для 1-го).

В дальнейшем рассмотрении система, состоящая из КП, отверстия и проводника имеет следующие ограничения: область соединения проводника и КП расположена сверху, проводник подключен к центру контактной площадки без дополнительного смещения по горизонтали, т. е. фигура симметрична относительно оси  $OY$  (Рисунок 35а). Рисунок 35а отображает в масштабе топологию с параметрами:  $R_{via} = 225$  мкм,  $R_{drill} = 100$  мкм,  $w_{tr\_d} = 100$  мкм, область допустимого смещения центра отверстия относительно КП соответствует классу применения 2. На рисунке 35б приведены параметры, которые необходимы для математического описания топологии «КП–проводник»:

- $w_{tr\_d}$  — проектируемая ширина проводника;
- $w_{tr\_d\_min}$  — минимально допустимая ширина проводника, которая может быть определена как проектируемая ширина проводника с учетом допустимого уменьшения ширины проводника в зависимости от класса применения или же как отдельная величина в соответствии с ТТ на ЭИ;



- $R_{via}$  — радиус КП переходного отверстия или металлизированного монтажного отверстия;
  - $R_{drill}$  — радиус просверленного отверстия без металлизации;
  - $R_{C_i}$  — радиус области  $Z_i$  допустимого смещения центра отверстия относительно контактной площадки для нефункциональной контактной площадки печатной платы с классом применения  $i$ ;
  - $(\pm x_1, y_1)$  — координаты точек пересечения границ проводника и КП:
- $x_1 = 0,5w_{tr\_d}$ ,  $y_1 = \sqrt{R_{via}^2 - 0,25w_{tr\_d}^2}$ , из решения для  $y_1$  следует ограничение, связывающее диаметр (или радиус) КП и проектируемую ширину проводника:  $D_{via} \geq w_{tr\_d}$ .

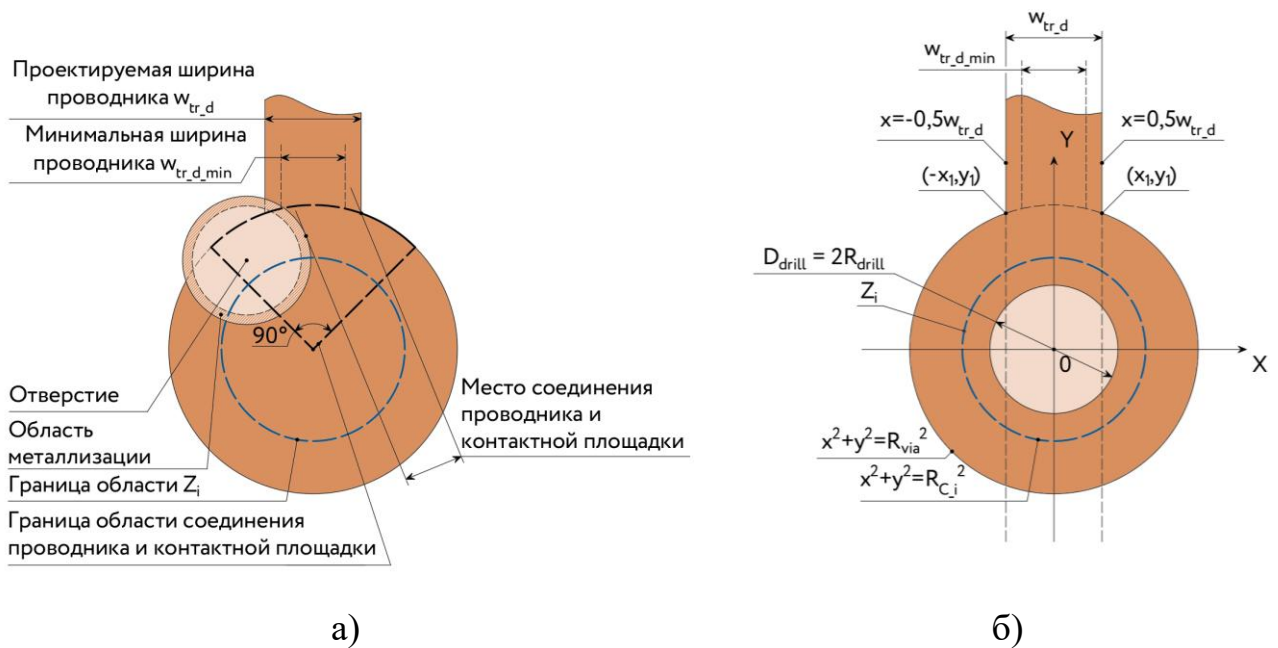


Рисунок 35 — Параметры КП: а) для определения требований к области соединения проводника и КП; б) для математического описания топологии

Чтобы определить вероятность выхода годной контактной площадки с подключенным проводником, необходимо определить: каким образом дополнительное требование, накладываемое на область соединения проводника и КП, влияет на изменение границы области  $Z_i$ . Сначала рассмотрен случай (Рисунок 36а), в котором проектируемая ширина проводника совпадает с минимально допустимой ( $w_{tr\_d} = w_{tr\_d\_min}$ ).

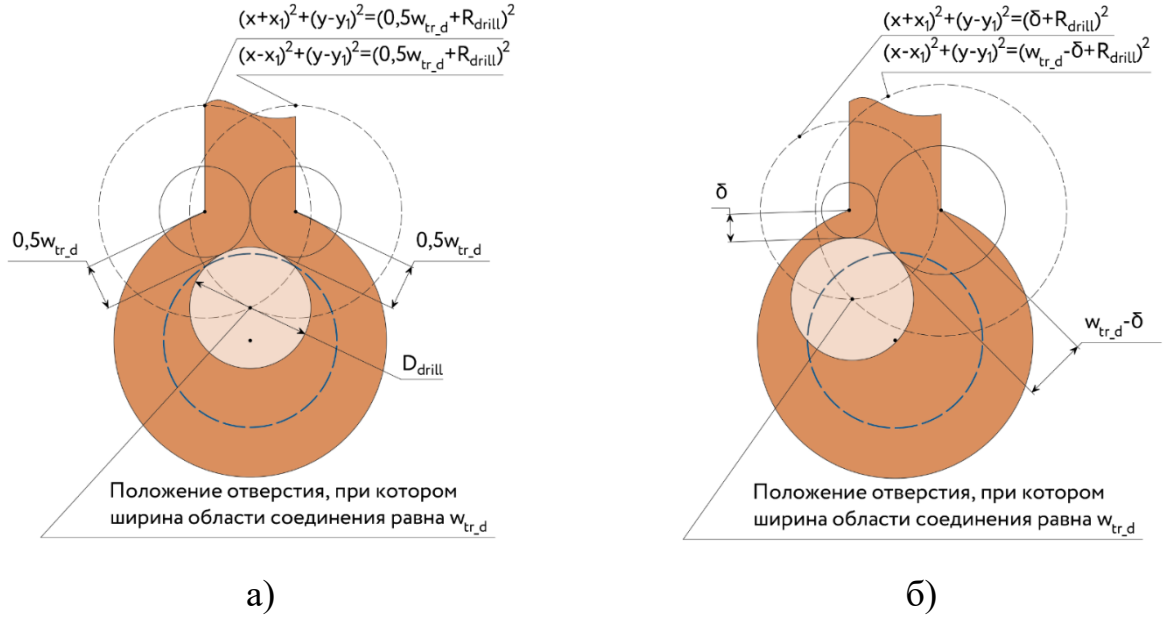


Рисунок 36 — Возможные предельные допустимые расположения отверстия по критерию ширины соединения проводника и КП (случай  $w_{tr\_d} = w_{tr\_d\_min}$ ): а) частный случай, центр отверстия смещен только вертикально относительно центра КП; б) общий случай, присутствует горизонтальное смещение

Одним из решений является симметричный относительно оси  $OY$  случай, в котором присутствует только вертикальное смещение центра отверстия относительно центра КП. Тогда, в силу симметрии, слева и справа от отверстия должны остаться два проводника с шириной  $0,5w_{tr\_d}$ . Этому случаю соответствует нижнее пересечение окружностей радиусом  $0,5w_{tr\_d} + R_{drill}$  и центрами в точках  $(\pm x_1, y_1)$  или решение системы уравнений (34):

$$\begin{cases} y = y_1 - \sqrt{(0,5w_{tr\_d} + R_{drill})^2 - (x + x_1)^2} \\ y = y_1 - \sqrt{(0,5w_{tr\_d} + R_{drill})^2 - (x - x_1)^2} \end{cases}. \quad (33)$$

Теперь возможно расширение частого случая до общего путем введения в систему (33) параметра  $\delta$  — радиуса окружности, определяющего ширину места соединения КП и проводника слева от отверстия. Тогда справа от отверстия необходимо обеспечить ширину проводника  $w_{tr\_d} - \delta$  при выполнении условия  $\delta_{min} \leq \delta \leq w_{tr\_d} - \delta_{min}$  ( $\delta_{min}$  — минимальное значение параметра  $\delta$ , обеспечивающее решение системы на границы области допустимого смещения

центра отверстия относительно центра КП). Тогда система (33) преобразуется к виду (34):

$$\begin{cases} y = y_1 - \sqrt{(\delta + R_{drill})^2 - (x + x_1)^2} \\ y = y_1 - \sqrt{(w_{tr\_d} - \delta + R_{drill})^2 - (x - x_1)^2} \end{cases}, \delta_{min} \leq \delta \leq w_{tr\_d} - \delta_{min}. \quad (34)$$

Решение системы уравнений (34) — дуга нижней половины эллипса, описываемого системой (35). Вывод решения представлен в приложении Г.

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a_{tr\_d}^2} + \frac{(y - y_1)^2}{b_{tr\_d}^2} = 1 \\ a_{tr\_d} = 0,5w_{tr\_d} + R_{drill} \\ b_{tr\_d} = \sqrt{R_{drill}(R_{drill} + w_{tr\_d})} \end{cases}. \quad (35)$$

Используя систему (35), граница области допустимого смещения отверстия для случая с подключенным проводником  $Z_i'$  будет иметь вид, представленный на рисунке 37, и состоять из окружности радиусом  $R_{C_i}$  и эллипса с полуосями  $a_{tr\_d}$  и  $b_{tr\_d}$ .

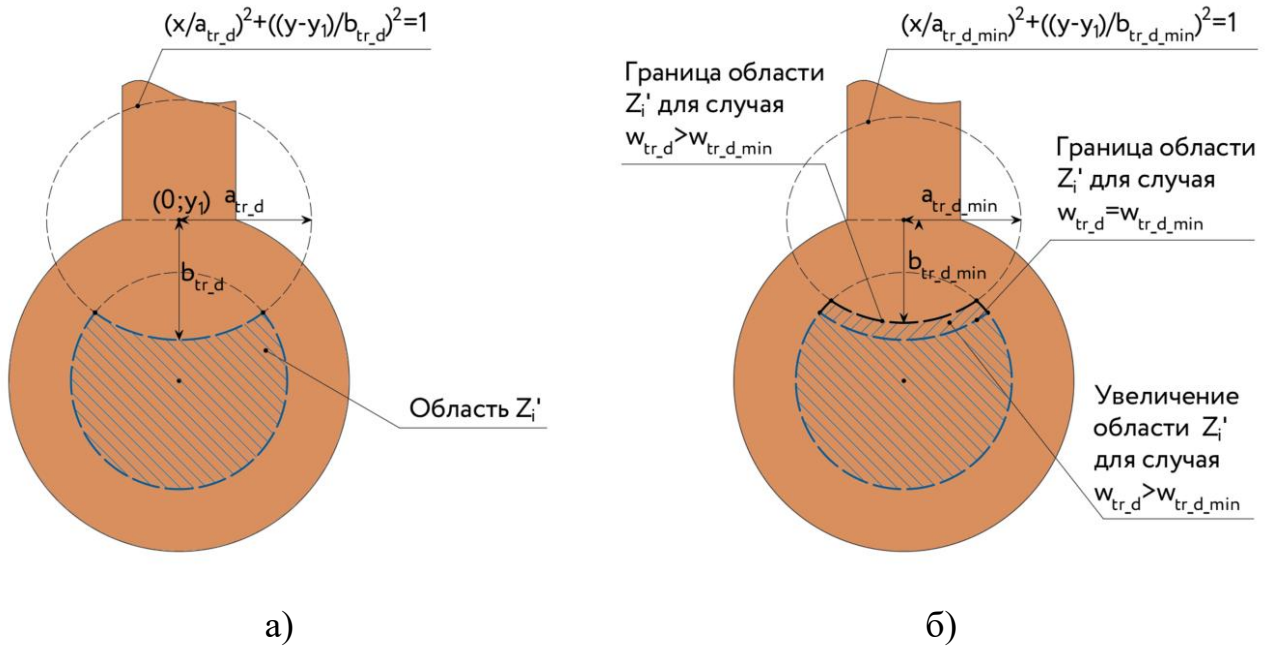


Рисунок 37 — Область допустимого смещения центра отверстия  $Z_i$  с учетом проводника а) для случая  $w_{tr\_d\_min} = w_{tr\_d}$ ; б) для случая  $w_{tr\_d} > w_{tr\_d\_min}$

Аналогичным образом определен вид кривой, ограничивающей область допустимого смещения отверстия относительно центра контактной площадки в области соединения контактной площадки и проводника для случая, когда

минимальная ширина проводника меньше проектируемого значения ( $w_{tr\_d\_min} < w_{tr\_d}$ ). Тогда система уравнений (34) преобразуется к виду (36):

$$\begin{cases} y = y_1 - \sqrt{(\delta + R_{drill})^2 - (x + x_1)^2} \\ y = y_1 - \sqrt{(w_{tr\_d\_min} - \delta + R_{drill})^2 - (x - x_1)^2} \end{cases}, \quad \delta_{min} \leq \delta \leq w_{tr\_d\_min} - \delta_{min}. \quad (36)$$

а решение системы (36) определяется формулой (37):

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a_{tr\_d\_min}^2} + \frac{(y - y_1)^2}{b_{tr\_d\_min}^2} = 1 \\ a_{tr\_d\_min} = 0,5w_{tr\_d\_min} + R_{drill} \\ b_{tr\_d\_min} = \frac{\sqrt{(2R_{drill} + w_{tr\_d\_min})^2 - w_{tr\_d}^2}}{2} \end{cases}. \quad (37)$$

Тогда, случай  $w_{tr\_d} = w_{tr\_d\_min}$  является предельным и соответствует максимальной площади ограничивающего область  $w_{tr\_d}$  (Рисунок 37б).

Оценка влияния изменения области допустимого смещения центра отверстия  $Z_i'$  на вероятность выхода бездефектной КП с подключенным проводником возможна с помощью определения новых пределов интегрирования для выражения (32). Поскольку по стандарту IPC-A-600G [70] зона соединения проводника и КП — это сектор контактной площадки размером  $90^\circ$ , расположенный около проводника, то введем дополнительное ограничение на размер эллипса (37). Эллипс (37) не должен содержать в себе центр КП, т. е. размер его полуоси  $b_{tr\_d\_min} \leq y_1$ . Тогда, область  $Z_i'$  в третьем и четвертом квадрантах координатной плоскости  $XOY$  не изменится, что позволяет их не рассматривать. Также в силу симметрии рисунка КП с проводником (Рисунок 38а) по вертикали относительно оси  $OY$ , возможно рассмотрение только четверти КП, расположенной в первом квадранте координатной плоскости  $XOY$ . Для математического описания изменения области  $Z_i'$  ее граница в части, описываемой эллипсом (37), представлена в параметрическом виде как зависимости координат  $x$  и  $y$  от длины радиус-вектора  $r$ , что геометрически (Рисунок 38б) является множеством точек  $(x_2(r), y_2(r))$  пересечения окружности с варьируемым радиусом  $r$  и эллипса (37).

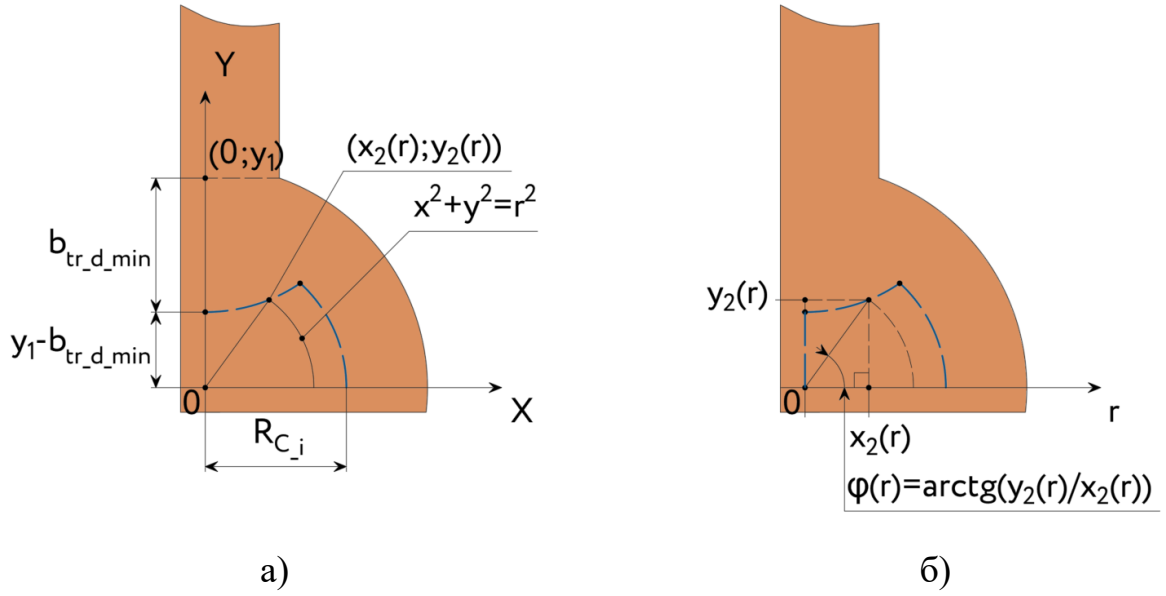


Рисунок 38 — Математическое описание изменения области допустимого смещения центра отверстия  $Z_i'$  а) в параметрическом виде как функций, зависящих от длины радиус-вектора  $r$  ( $x_2(r), y_2(r)$ ); б) в полярной системе координат  $\varphi(r)$

Для определения координат  $(x_2(r), y_2(r))$  необходимо решить систему уравнений (38):

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = r^2 \\ \frac{x^2}{a_{tr\_d\_min}^2} + \frac{(y - y_1)^2}{b_{tr\_d\_min}^2} = 1 \end{cases}, \quad y_1 - b_{tr\_d\_min} \leq r \leq R_{C_i}. \quad (38)$$

Поскольку в общем виде окружность и эллипс могут иметь до четырех точек пересечения, то в силу наложенных ограничений на расположение проводника и контактной площадки, искомым является пересечение нижней правой четверти эллипса и верхней правой четверти окружности. Тогда частное решение системы (38), удовлетворяющее этому условию, примет вид (39):

$$\begin{cases} y_2(r) = \frac{a_{tr\_d\_min}^2 y_1 - b_{tr\_d\_min} \sqrt{a_{tr\_d\_min}^2 (s + y_1^2) - r^2 s}}{s} \\ s = a_{tr\_d\_min}^2 - b_{tr\_d\_min}^2 \\ x_2(r) = \sqrt{r^2 - y_2(r)^2} \\ y_1 - b_{tr\_d\_min} \leq y_1 \leq r \leq R_{C_i} \end{cases}. \quad (39)$$

Полученная система уравнений (39) позволяет представить границу области допустимого смещения центра отверстия  $Z_i'$  в полярной системе координат в виде функции  $\varphi(r)$  (40):

$$\varphi(r) = \begin{cases} \frac{\pi}{2}, & 0 \leq r \leq y_1 - b_{tr\_d\_min} \\ \arctg\left(\frac{y_2(r)}{x_2(r)}\right), & y_1 - b_{tr\_d\_min} \leq r \leq R_{Ci} \\ b_{tr\_d\_min} \leq y_1 \end{cases} \quad (40)$$

При увеличении величины радиус-вектора  $r$  от нуля до значения  $(y_1 - b_{tr\_d\_min})$ , соответствующей точке с минимальным значением ординаты эллипса (37), в область  $Z_i'$  попадает вся четверть окружности, что соответствует диапазону по углу от 0 до  $\frac{\pi}{2}$ . В диапазоне варьирования радиус-вектора  $r$  от  $(y_1 - b_{tr\_d\_min})$  до  $R_{Ci}$  угол ограничен диапазоном от 0 до  $\arctg\left(\frac{y_2(r)}{x_2(r)}\right)$ , т. е. условие  $b_{tr\_d\_min} \leq y_1$  ограничивает максимальный размер эллипса по оси  $OY$  величиной верхней половины КП.

Полученное выражение (40) задает пределы интегрирования для определения вероятности попадания центра отверстия в область  $Z_i'$  для верхней правой четверти КП. В силу симметрии по вертикали вероятность попадания верхнюю часть области  $Z_i'$  — удвоенная величина попадания в четверть. с учетом того, что вероятность попадания в нижнюю часть КП не отличается от случая нефункциональной КП из-за отсутствия изменения в ней границы области  $Z_i'$ , то величина вероятности выхода КП, соответствующей требованиям приемки,  $P_{via}$  определяется выражением (41):

$$P_{via} = P(O_{drill} \in D_i) = \frac{P_{via\_nf}}{2} + \frac{1}{\pi \sigma_{drill}^2} \int_0^{R_{Ci}} \int_0^{\varphi(r)} r \cdot e^{\frac{-r^2}{2\sigma_{drill}^2}} d\varphi dr. \quad (41)$$

Первое слагаемое выражения (41) описывает вероятность попадания в нижнюю половину КП, а второе — в верхнюю.

На основе полученного выражения (41) возможно определить характер и степень влияния подключенного проводника на вероятность выхода бездефектной

КП, а также оценить влияние конструктивных параметров заготовки (минимально допустимой  $w_{tr\_d\_min}$  и проектируемой  $w_{tr\_d}$  ширин проводника, диаметров КП  $D_{via}$  и переходных отверстий  $D_{drill}$ ) и погрешности технологической операции сверления  $\sigma_{drill}$  на вероятность выхода годной КП  $P_{via}$  и заготовки, соответственно.

### 3.4 Вероятность выхода контактной площадки, соответствующей требованиям приемки, для процесса сверления

Используя выражение (41), построено семейство кривых, описывающих вероятность изготовления годной КП  $P_{via}$  в зависимости от ее диаметра  $D_{via}$  (Рисунок 39а).

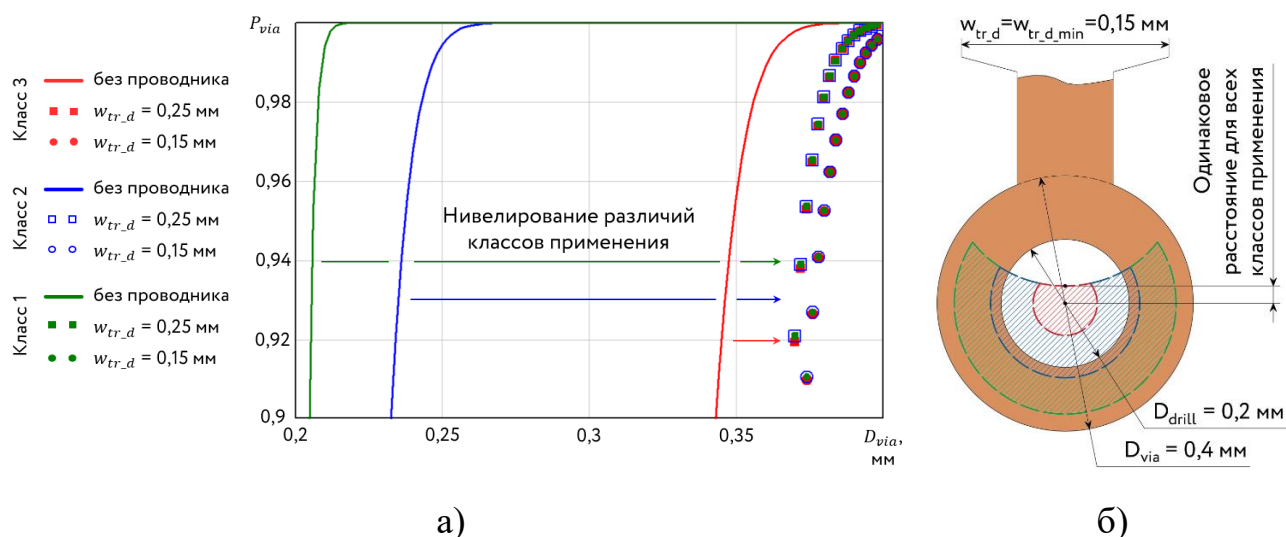


Рисунок 39 — Влияние подключения проводника к КП: а) вероятность выхода годной КП  $P_{via}$  от ее диаметра  $D_{via}$ ; б) области допустимого смещения центра отверстия относительно центра КП  $Z_i'$  для разных классов применения

При моделировании рассмотрены случаи нефункциональной КП, а также КП с подключенным проводником шириной  $w_{tr\_d}$  равной 0,15 мм или 0,25 мм для разных классов применения. Остальные параметры моделирования имеют следующие значения:  $D_{drill} = 0.2$  мм;  $w_{tr\_d\_min} = 0.15$  мм;  $\sigma_{drill} = 10$  мкм.

Сравнительный анализ полученных кривых позволил сформировать следующие результаты:

- 1) Вне зависимости от предъявляемого класса применения результаты моделирования случаев с проводником смещены в область больших диаметров, т. е. для обеспечения требуемой вероятности выхода годных потребуется больший диаметр КП.
- 2) Результаты моделирования случаев с проводником одинаковой ширины (Рисунок 39, кривые из квадратных или круглых маркеров) практически совпадают — это объясняется значительным изменением области  $Z_i'$  допустимого смещения центра отверстия относительно центра КП. Поскольку случайные величины отклонения центра отверстия по осям принадлежат нормальным законам распределения, то их более вероятные значения находятся ближе к центру, которые одинаково отсекаются введенным ограничением и нивелируют различия между требованиями классов применения (Рисунок 39б, вне зависимости от класса применения минимальное расстояние от центра КП до края областей  $Z_i'$  одинаково).
- 3) Увеличение проектируемой ширины проводника  $w_{tr\_d}$  относительно минимально допустимой  $w_{tr\_d\_min}$ , в свою очередь, имеет противоположный эффект: смещает кривые в левую сторону (Рисунок 39а, линии из квадратных маркеров относительно круглых), что объясняется увеличением площади области  $Z_i'$  (Рисунок 39б). Тогда, при достаточно больших значениях  $w_{tr\_d}$  (близких к  $D_{via}$ ) область соединения КП и проводника не оказывает влияние на изменение области  $Z_i'$ , и кривая вероятности имеет вид, характерный для нефункциональной КП.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что критерии приемки для области подключения проводника к КП в значительной степени более жестки, чем на саму КП, что обусловлено существенным изменением области допустимого смещения центра отверстия относительно центра КП.

Также с помощью модели (41) возможно отдельно оценить влияние конструктивных параметров проекта ПП, а также точности позиционирования сверлильного станка на вероятность выхода годной КП. На рисунке 40 представлено изменение кривой вероятности выхода годной КП  $P_{via}$  от ее диаметра



$D_{via}$  при варьировании проектируемой  $w_{tr\_d}$  и минимально допустимой  $w_{tr\_d\_min}$  ширин проводника, при постоянных значениях диаметра переходного отверстия  $D_{drill} = 0,2$  мм и СКО ошибки позиционирования сверлильного станка  $\sigma_{drill} = 10$  мкм.

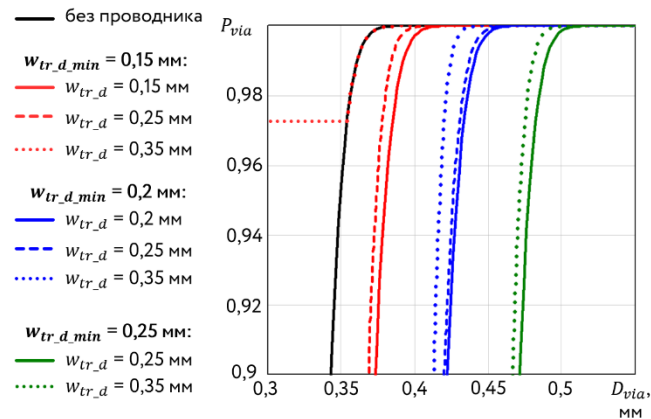


Рисунок 40 — Влияние параметров модели (41) на вероятность выхода годной контактной площадки при варьировании диаметра контактной площадки ( $D_{drill} = 0,2$  мм;  $\sigma_{drill} = 10$  мкм, класс применения 3)

В ходе моделирования сформированы ограничения на область допустимых значений переменных:

- 1) диаметр КП должен быть не меньше проектируемой ширины проводника ( $D_{via} \geq w_{tr\_d}$ ), в противном случае проводник полностью покрывает КП, т. е. размер КП будет определяться шириной проводника (Рисунок 40, красная пунктирная линия  $w_{tr\_d} = 0,35$  мм, область  $D_{via} < 0,35$  мм);
- 2) диаметр КП  $D_{via}$  должен быть не меньше суммы минимально допустимой ширины проводника  $w_{tr\_d\_min}$  и диаметра отверстия  $D_{drill}$  ( $R_{via} \geq w_{tr\_d\_min} + D_{drill}$ ), так как в случае равенства представленного выражения граница эллипса области  $Z_i'$  проходит через центр КП;
- 3) минимальная ширина проводника должна не больше проектируемой ( $w_{tr\_d\_min} \leq w_{tr\_d}$ ), так как нарушение этого ограничения заведомо не удовлетворяет предъявляемым к ПП требованиям;

Полученные зависимости позволяют сделать следующие выводы, определяющие влияние конструктивных параметров ПП на вероятность выхода годной КП:

- 1) Увеличение требований к минимальной ширине проводника  $w_{tr\_d\_min}$  влияет на пропорциональное увеличение размеров КП, например (Рисунок 40, сплошные линии), обеспечение одинаковой вероятности  $P_{via} = 0,997$  для случаев с разной минимальной шириной проводника  $w_{tr\_d\_min}$ : 0,15; 0,2 и 0,25 мм происходит при диаметрах КП  $D_{via}$ : 0,4; 0,45 и 0,5 мм.
- 2) Увеличение проектируемой ширины проводника  $w_{tr\_d}$  нивелирует негативный эффект от области подключения проводника к КП (Рисунок 40, красная пунктирная линия), в таком случае кривая вероятности приближается к предельному случаю, характерному для нефункциональной КП.

На рисунке 41 представлено изменение кривой вероятности выхода годной КП  $P_{via}$  в зависимости от точности позиционирования сверлильного станка  $3\sigma_{drill}$  при варьировании проектируемой ширины проводника  $w_{tr\_d}$  и класса применения, при постоянных значениях диаметров КП  $D_{via} = 0,4$  мм переходного отверстия  $D_{drill} = 0,2$  мм, а также минимально допустимой ширины проводника  $w_{tr\_d\_min} = 0,15$  мм.

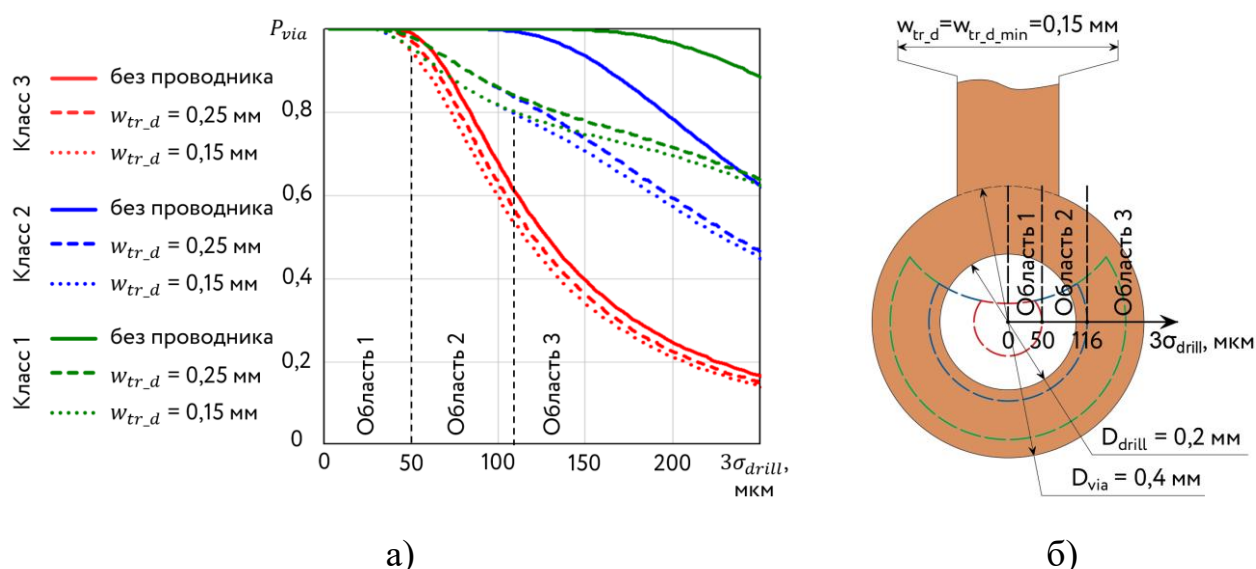


Рисунок 41 — Влияние параметров модели (41) на вероятность выхода годной КП при варьировании точности позиционирования сверлильного станка ( $D_{via} = 0,4$  мм;  $D_{drill} = 0,2$  мм;  $w_{tr\_d\_min} = 0,15$  мм): а) результаты моделирования; б) сопоставление точности позиционирования с конструктивными параметрами, используемыми при моделировании

График можно условно разбить на 3 области:

- 1) область высокой точности (Рисунок 41а, область 1), на которой вероятность  $P_{via}$  не зависит от класса применения;
- 2) область средней точности (Рисунок 41а, область 2), на которой вероятность  $P_{via}$  для изделий классов 1 и 2 одинакова, но выше, чем для изделий класса 3;
- 3) область низкой точности (Рисунок 41а, область 3), на которой вероятность  $P_{via}$  для изделий классов 1 и 2 начинает отличаться.

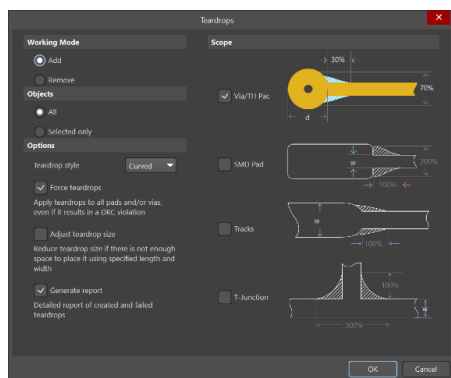
Границы между областями соответствуют радиусам областей  $R_{C_i}$  для разных классов применения:  $R_{C_3} = 50$  мкм (25);  $R_{C_2} = 116$  мкм (26). Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом (Рисунок 41б): для области 1 справедливо полное включение эллипса рассеивания с полуосями размером  $3\sigma_{drill}$  в окружность с радиусом  $R_{C_3}$  и уменьшение вероятности  $P_{via}$  происходит только за счет области соединения проводника и КП. В области 2 эллипс рассеивания полностью покрывает область допустимого смещения центра отверстия  $Z_3'$ , и потому снижение вероятности с увеличением  $3\sigma_{drill}$  для изделий 3 класса применения происходит с большей скоростью, чем для изделий классов 2 и 1, у которых уменьшение вероятности по-прежнему обусловлено только областью соединения проводника и КП. Аналогичным образом формируется область 3 путем сравнения случаев для классов 2 и 1.

### **3.5 Методика определения параметров каплевидной контактной площадки сквозного металлизированного отверстия**

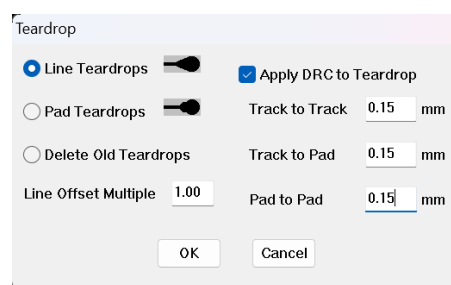
Проведенное моделирование вероятности выхода годной КП на операции сверления показало, что одним из возможных способов повышения последней является увеличение проектируемой ширины проводника  $w_{tr\_d}$  относительно минимально допустимой  $w_{tr\_d\_min}$ . Однако, подобное решение в значительной степени уменьшает доступное пространство для прокладки межсоединений. Тогда возможно внедрение в проект ПП локальных расширений в области соединения

проводника и КП, которые при смещении центра отверстия в эту область не позволяют уменьшить ширину соединения меньше допустимой.

КП с такими расширениями называются каплевидными (teardrops) и описаны на информационных ресурсах, посвященных проектированию печатных плат [119] и системах автоматизированного проектирования (САПР) и технологической подготовки производства (Рисунок 42), например, в Altium Designer, KiCad, Eagle, CAM350 и др.



а)



б)

Рисунок 42 — Пользовательские интерфейсы меню создания каплевидных контактных площадок: а) Altium Designer; б) CAM350

Но, несмотря на распространенность каплевидных КП, в САПР имеются недостатки при работе с ними:

- 1) утолщения для КП либо создаются полностью автоматически без указания допустимых ограничений на их формирование, либо пользователь-конструктор должен самостоятельно их сформировать (в этом случае неизвестно на основе какой информации должны быть определены параметры каплевидной КП);
- 2) форма создаваемых утолщений определяется производителем программного продукта, используемого в процессе разработки ППП (Рисунок 43) — основной формой является линейное расширение, которое поддерживается большинством производителей, но также встречаются формы «снеговик» (snowman, используется в CAM350), создаваемая с помощью добавления в области соединения проводника и КП дополнительного круга с меньшим диаметром относительно контактной

площадки, а также форма с нелинейным расширением проводника (используется в Altium Designer).

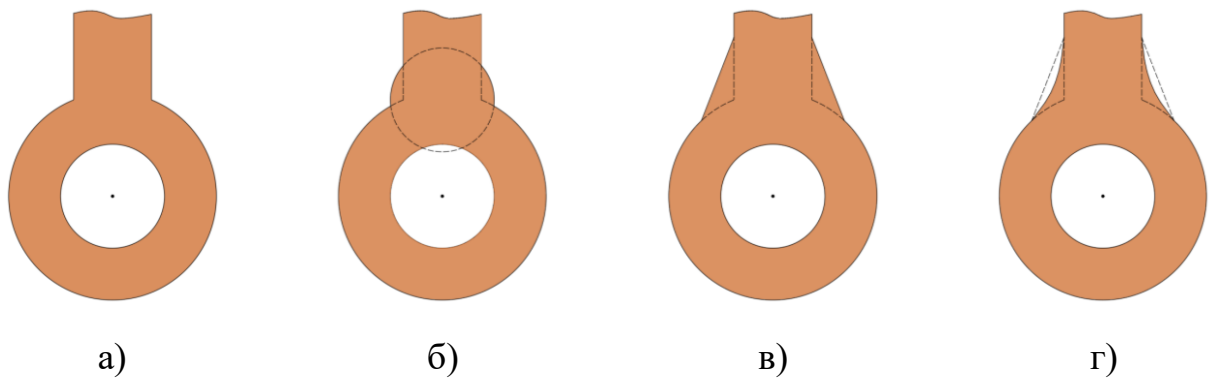


Рисунок 43 — Формы КП: а) без расширения; б) с расширением «снеговик»; в) с линейным расширением; г) с нелинейным расширением

Приведенные недостатки не позволяют количественно оценить степень влияния таких расширений на конечное качество ПП. В таком случае можно сформировать следующий критерий оптимального утолщения для каплевидной КП: вероятность ее изготовления  $P_{via}$  должна быть равна вероятности изготовления нефункциональной КП  $P_{via\_nf}$  ( $P_{via} = P_{via\_nf}$ ). Этот составной критерий является комбинацией двух взаимно ограничивающих друг друга простых. С одной стороны, необходимо максимизировать вероятность выхода годной КП, другой стороны — обеспечить минимальную площадь КП для экономии трассировочного пространства.

На выбор предпочтительной формы каплевидной КП влияет 2 фактора: обеспечение возможности удовлетворения ей сформированного критерия оптимальности, удобство ее формирования для автоматизации процесса их добавления в проект ПП. с переходом от формы «снеговик» к линейному и затем к нелинейному расширению возможно реализовать геометрию все более сложной формы, что позволяет получить более оптимальную форму КП, однако вместе с этим растет и требуемая вычислительная сложность для построения геометрии. Так, для построения каплевидной КП с формой «снеговик» требуются координаты центра круга утолщения и его диаметр, а само утолщение представляет из себя круг, т. е. стандартную апертуру формата Gerber RS-274X, который используется при ТПП. Линейное расширение может быть реализовано как в виде отдельных

линий из круговых апертур, так и в виде треугольников. Нелинейное расширение требует точечного определения геометрии в виде полигона, что накладывает ограничения на возможности ее дальнейшего редактирования.

На текущем этапе выбрано линейное представление расширения, как компромиссное решение. Чтобы сформировать каплевидную КП, удовлетворяющую ранее сформированному критерию оптимальности, разработана методика (Рисунок 44).

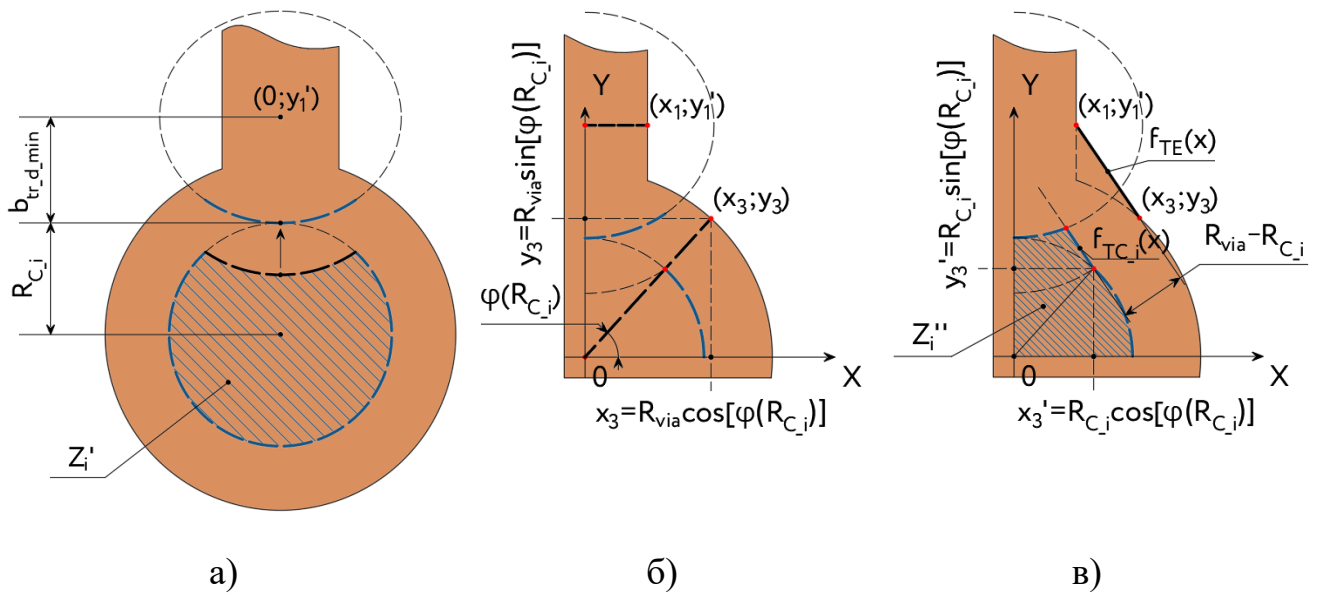


Рисунок 44 — Построение каплевидной КП: а) смещение эллипса, ограничивающего область  $Z_i'$ ; б) определение ключевых точек, формирующих расширение; в) функциональное определение КП и области  $Z_i''$  в месте расширения

Методика определения параметров каплевидной КП включает в себя следующие этапы:

- 1) Сдвиг эллипса (37), ограничивающего область допустимого смещения центра отверстия относительно центра КП  $Z_i'$ , по вертикали таким образом (Рисунок 44а), чтобы он пересекался с окружностью  $R_{C\_i}$  только в одной точке с координатами  $(0; R_{C\_i})$ . Тогда центр эллипса должен иметь координаты  $(0; R_{C\_i} + b_{tr\_d\_min}) = (0; y_1')$ .
- 2) Определение точек на проводнике и контактной площадке, через которые будет построено расширение. В силу симметрии рисунка по вертикали по оси  $OY$  далее будет рассмотрена только правая половина контактной

площадки (Рисунок 44б). Первая точка, лежащая на границе проводника, должна принадлежать горизонтальной прямой  $y = y'_1$ , так как с учетом смещения эллипса эта прямая является границей между проводником и КП. Вторая точка — пересечение окружности  $R_{via}$  и прямой, проходящей через центр координат и точку пересечения окружности  $R_{Ci}$  и эллипса с центром в точке  $(0; y_1)$ . Таким образом, первая точка линии расширения имеет координаты  $(x_1; y'_1)$ , а вторая —  $(R_{via} \cos(\varphi(R_{Ci})); R_{via} \sin(\varphi(R_{Ci}))) = (x_3; y_3)$ .

- 3) Формирование уравнения прямой расширения контактной площадки  $f_{TE}(x)$  (Рисунок 44в), а также линии  $f_{TC_i}(x)$ , замыкающей область  $Z'_i$  (область  $Z''_i$ ).  $f_{TE}(x)$  — прямая, проходящая через точки  $(x_1; y'_1)$  и  $(x_3; y_3)$ , которая определяется по формуле (42):

$$f_{TE}(x) = \left( \frac{x_3 - x_1}{y_3 - y'_1} \right) x + \left[ y'_1 - x_1 \left( \frac{x_3 - x_1}{y_3 - y'_1} \right) \right]. \quad (42)$$

Для поиска  $f_{TC_i}(x)$  введем допущение, что последняя линия также является прямой, параллельной прямой  $f_{TE}(x)$  и проходящей через точку  $(x'_3; y'_3) = (R_{Ci} \cos(\varphi(R_{Ci})), R_{Ci} \sin(\varphi(R_{Ci})))$ , которая является пересечением окружности  $R_{Ci}$  и эллипса с центром в точке  $(0; y_1)$ . В реальности это справедливо только для КП изделий третьего класса применения, а при формировании этой линии для второго и первого классов необходимо использовать условия стандарта IPC-A-600G [70], которые использовались ранее. Однако, отсутствие этого допущения усложнит вид границы области  $Z''_i$ , при этом незначительно увеличивая ее площадь. В данном случае построенная прямая является более жестким критерием ограничения области  $Z''_i$ , так как дуга отверстия, выходящая за пределы КП, будет меньше заданной классом применения. Тогда  $f_{TC_i}(x)$  определяется выражением (43):

$$f_{TCi}(x) = \left( \frac{x_3 - x_1}{y_3 - y_1'} \right) x + \left[ y_3' - x_3' \left( \frac{x_3 - x_1}{y_3 - y_1'} \right) \right]. \quad (43)$$

Таким образом, полученная форма каплевидной КП компенсирует негативное влияние области соединения проводника и КП (Рисунок 45). Участки области  $Z_i''$ , которые выходят за пределы окружности радиуса  $R_{C_i}$  не внесут значительного вклада в увеличение вероятности из-за формы функции плотности закона распределения. с другой стороны, исключение этих участков требует построения расширения более сложной формы. Поэтому, учитывая малую площадь этих участков, ими можно пренебречь и считать, что КП удовлетворяет условию оптимальности, сформированному выше.

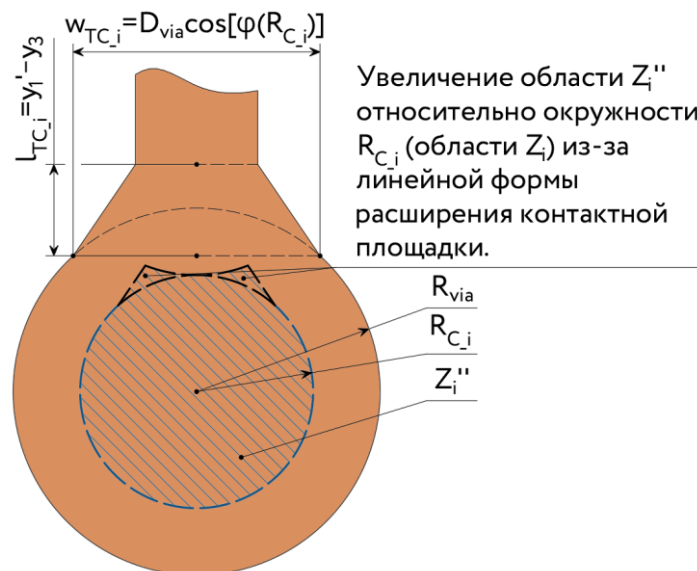


Рисунок 45 — Каплевидная КП: ее параметры и область  $Z_i''$ , ограничивающая допустимое смещение центра отверстия относительно центра КП

Для обеспечения возможности применения разработанной методики в САПР, сформированы параметры расширения в обозначениях, используемых в программе Altium Designer (Рисунок 45). В программе для описания каплевидной КП используются ее длина  $l_{TCi}$  и ширина  $w_{TCi}$  (при представлении области расширения в виде трапеции  $l_{TCi}$  — ее высота, а  $w_{TCi}$  — нижнее основание и хорда окружности  $R_{via}$ ), выраженные в процентном отношении от диаметра КП. Тогда, абсолютные параметры расширения КП определяются системой (44):



$$\begin{cases} l_{TCi} = y'_1 - y_3 \\ w_{TCi} = D_{via} \cos(\varphi(R_{Ci})) \end{cases} \quad (44)$$

относительные параметры расширения КП — системой (45):

$$\begin{cases} l_{TCi}' = \frac{y'_1 - y_3}{D_{via}} \cdot 100 \% \\ w_{TCi}' = \cos(\varphi(R_{Ci})) \cdot 100 \% \end{cases} \quad (45)$$

Переходя к исследованию эффективности разработанной методики определения параметров каплевидной КП, определены параметры утолщений «капли» для примера, используемого ранее при моделировании (п. 3.4) с параметрами: диаметр КП  $D_{via} = 0,4$  мм; диаметр отверстия  $D_{drill} = 0,2$  мм; минимально допустимая ширина проводника  $w_{tr\_d\_min} = 0,15$  мм; проектируемая ширина проводника  $w_{tr\_d} \in \{0,15; 0,2; 0,25\}$  мм. Рассчитанные параметры утолщений для КП представлены в таблице 4.

Таблица 4 — Параметры КП при моделировании

| Класс применения | Параметры утолщения                     | Ширина проводника $w_{tr\_d}$ , мм |                  |                  |
|------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------|
|                  |                                         | 0,15                               | 0,2              | 0,25             |
| 3                | Длина $l_{TCi}'$ , % ( $l_{TCi}$ , мм)  | <b>21</b> (0,08)                   | <b>15</b> (0,06) | <b>7</b> (0,03)  |
|                  | Ширина $w_{TCi}'$ , % ( $w_{TCi}$ , мм) | <b>78</b> (0,31)                   | <b>75</b> (0,3)  | <b>70</b> (0,28) |
| 2                | Длина $l_{TCi}'$ , % ( $l_{TCi}$ , мм)  | <b>44</b> (0,18)                   | <b>41</b> (0,16) | <b>35</b> (0,14) |
|                  | Ширина $w_{TCi}'$ , % ( $w_{TCi}$ , мм) | <b>87</b> (0,35)                   | <b>87</b> (0,35) | <b>87</b> (0,35) |
| 1                | Длина $l_{TCi}'$ , % ( $l_{TCi}$ , мм)  | <b>55</b> (0,22)                   | <b>52</b> (0,21) | <b>48</b> (0,19) |
|                  | Ширина $w_{TCi}'$ , % ( $w_{TCi}$ , мм) | <b>83</b> (0,33)                   | <b>84</b> (0,34) | <b>85</b> (0,34) |

По найденным параметрам построены каплевидные КП и для них определены области допустимого смещения центра отверстия  $Z_i''$  для трех классов применения (Рисунок 46). По полученным рисункам видно, что во всех случаях область  $Z_i''$  включает в себя окружность радиусом  $R_{Ci}$ , из чего можно сделать вывод о том, что вероятность бездефектного изготовления построенных каплевидных КП  $P_{via}$  выше, чем у соответствующих им нефункциональным  $P_{via\_nf}$  ( $P_{via\_nf} < P_{via}$ ). Тогда в качестве более строгой оценки вероятности изготовления каплевидной КП  $\hat{P}_{via}$  можно пользоваться соответствующим выражением (29) для нефункциональной КП ( $\hat{P}_{via} \approx P_{via\_nf}$ ).

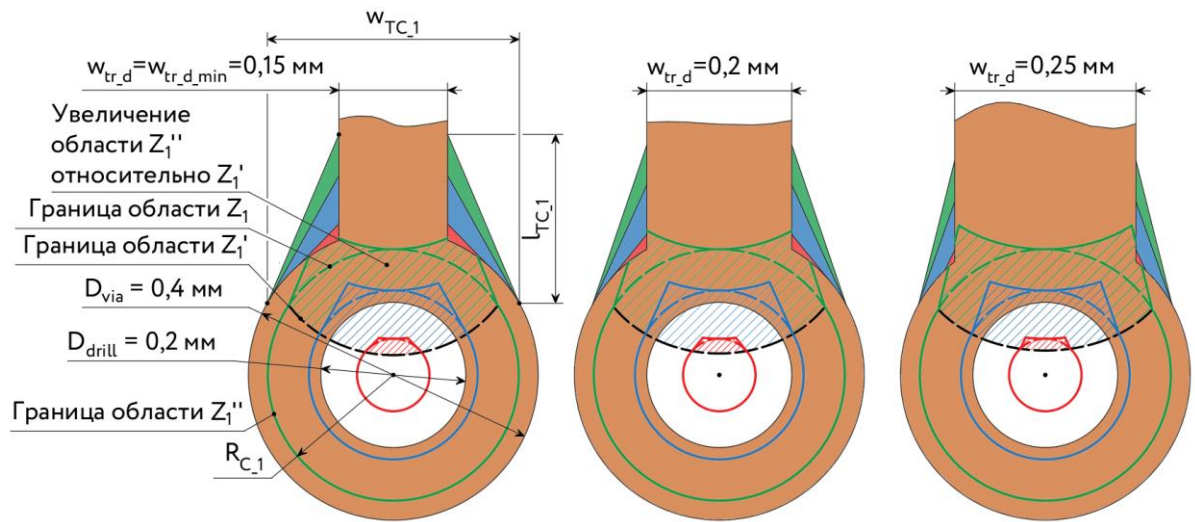


Рисунок 46 — Построение каплевидных КП по разработанной методике: красным цветом обозначены области утолщения для класса применения 3, синим — для класса 2, зеленым — для класса 1; сплошными линиями соответствующих цветов обозначены границы областей  $Z_i''$ , пунктирными — областей  $Z_i$

На рисунке 46 можно увидеть, что для классов применения с меньшими требованиями необходимо расширение большего размера. Это явление связано с тем, что при снижении класса увеличивается окружность  $R_{C_i}$  и эллипс, ограничивающий область  $Z_i''$ , отсекает большую площадь, которую, согласно сформированному критерию оптимальности, необходимо вернуть.

С помощью выражений (32) и (41) проведено сравнение требуемой точности позиционирования сверлильного станка  $3\sigma_{drill}$ , необходимой для изготовления заготовки с годной КП в случае наличия расширения и без него (Таблица 5). Согласно правилу «трех сигма» [99], приемлемая погрешность позиционирования должна обеспечивать вероятность попадания в область допустимого смещения отверстия  $Z_i''$  на уровне 0,997.

Таблица 5 — Требуемая погрешность позиционирования сверлильного станка  $3\sigma_{drill}$  для бездефектного изготовления КП ( $P_{via} = 0,997$ ), мкм

| Класс применения | Контактная площадка обычной формы |                      |                       | Каплевидная контактная площадка ( $w_{tr\_d}$ не влияет на результат) |
|------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------|
|                  | $w_{tr\_d} = 0,15$ мм             | $w_{tr\_d} = 0,2$ мм | $w_{tr\_d} = 0,25$ мм |                                                                       |
| 3                | 30                                | 33                   | 37                    | 45                                                                    |
| 2                | 30                                | 33                   | 37                    | 102                                                                   |
| 1                | 30                                | 33                   | 37                    | 152                                                                   |

Из результатов (Таблица 5) видно, что каплевидная КП позволяет значительно снизить требования к точности оборудования для сверления ПП. Так, величина допустимого смещения отверстия для устройств класса применения 3 увеличится от 20 % до 50 %, для класса 2 — от 175 % до 240 %, а для класса 1 — от 310 % до 406 %. Таким образом, сравнивая результаты, полученные при  $w_{tr\_d} = 0,15$  мм (как наиболее сложный случай для производства из рассмотренных), использование каплевидных КП позволяет снизить требования к точности используемого для сверления оборудования от 1,5 до 5 раз в зависимости от класса применения.

### 3.6 Выводы по главе

В главе описан процесс создания и исследования модели оценки вероятности изготовления годной КП сквозного металлизированного отверстия в зависимости от:

- конструктивных параметров проекта ПП: вида КП (нефункциональная, с подключенным проводником), диаметра переходного отверстия, минимально допустимой и проектируемой ширины проводника;
- технологических возможностей производства, выраженных в виде точности позиционирования сверлильного оборудования;
- требований к качеству изделия, представленных в виде классов применения и сформированных на основе международных стандартов по проектированию и приемке жестких ПП.

В ходе исследования:

- 1) Определена взаимосвязь между конструктивными параметрами КП ПП, технологическими возможностями производства и требуемым качеством выходного продукта с помощью величины вероятности обеспечения допустимого смещения центра переходного отверстия относительно центра ПП.
- 2) Построена модель (32), описывающая вероятность выхода годной нефункциональной КП, и определены ее ограниченные возможности по

использованию, обусловленные отсутствием учета требований к области соединения «проводник-контактная площадка».

- 3) В модель (32) добавлены требования к области соединения «проводник – КП» (41). Моделирование показало нивелирование влияния класса применения для КП с подключенным проводником, поскольку введенное требование значительно уменьшает область допустимого смещения центра переходного отверстия относительно центра КП. Сформированы ограничения на допустимые значения конструктивных параметров для обеспечения адекватности результатов моделирования. Проведена оценка влияния конструктивных и технологических параметров модели на вероятность выхода годной КП;
- 4) Разработана методика определения параметров каплевидной КП, обеспечивающая увеличение вероятности ее бездефектного изготовления и экономичное использование трассировочного пространства. Геометрическое основание предложенной методики предоставляет возможности для создания алгоритма автоматического формирования каплевидных КП для САПР и систем ТПП ПП. Подтверждена возможность применения методики для снижения диаметра КП или требований к точности позиционирования оборудования для увеличения вероятности выхода годных. 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).

Представленное в главе исследование имеет ряд ограничений, обусловленное определением влияния единичного элемента конструкции на качество заготовки:

- 1) предполагается, что характеристики точности позиционирования оборудования постоянны и не зависят: от координаты просверленного отверстия (обычно предполагается, что точность оборудования снижается по мере его удаления от точки машинного нуля [101]), времени его работы

(накапливаемая ошибка позиционирования), деградации его составных частей;

- 2) исследовано влияние на одну контактную площадку, а не заготовку в целом;
- 3) не учтено влияние смещения положения КП, вызываемое деформацией базового материала в процессе ее изготовления, а также возможное рассовмещение КП одного переходного отверстия на разных слоях МПП.

Таким образом, необходимо осуществить переход от оценки влияния единичного элемента к влиянию интегральной совокупности всех элементов заготовки на ее качество.

## **Глава 4. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫХОДА ГОДНОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕНИЯ**

### **4.1 Дефекты печатных плат, возникающие в процессах совмещения**

Современные электронные изделия создаются на основе ПП, представляющих многослойную структуру, состоящую из диэлектрического основания и проводящего рисунка. Одно из главных требований, предъявляемых к современным электронным изделиям — снижение массогабаритных показателей аппаратуры. с целью удовлетворения этого требования МПП постоянно усложняются, увеличивается плотность межслойных соединений. Увеличение плотности соединений неизбежно связано с уменьшением размеров элементов проводящего рисунка, что приводит к возникновению проблемы пространственного совмещения КП переходных отверстий [102, 103] для создания надежных межслойных переходов.

Совмещение, как процесс, в свою очередь, является составляющей большинства ТО производства ПП — для МПП на этапе фотолитографии необходимо обеспечить корректное положение фотошаблона с проводящим рисунком относительно заготовок слоев, на этапе прессования — совпадение положения КП между собой, на этапе сверления — совпадение координат центров КП и отверстий.

Таким образом, вне зависимости от ТО, на которой необходимо осуществить совмещение, справедливо общее требование к качеству операций, выраженное через требование к изделию — обеспечить совпадение координат элементов проводящего рисунка между слоями. В первую очередь это касается переходных металлизированных отверстий и их КП (Рисунок 47). Такое требование допускает смещение КП между слоями ПП, если оно обеспечивает возможность для создания трансверсальных соединений, удовлетворяющих требованиям приемки. Однако, целевым требованием является обеспечение соответствия между

результатирующими координатами элементов проводящего рисунка изделия и эталонными, заданными при проектировании ПУ.

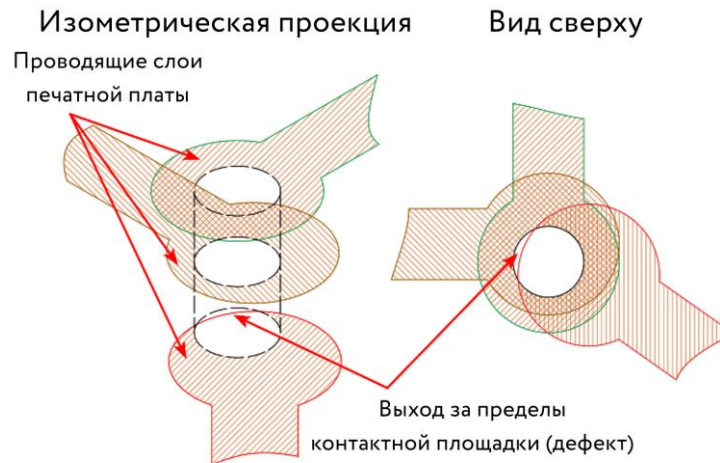


Рисунок 47 — Влияние несовпадения координат элементов проводящего рисунка на возникновение дефектов на ПП

Относительно дефектов, выделенных на ранее рассмотренных технологических операциях фотолитографии (п. 2.1.1), травления (п. 2.2.1), и сверления (п. 3.1), рассовмещение — результат совокупного влияния нескольких технологических операций, т. е. дефект, характеризующий весь процесс изготовления ПП в целом. При этом, свой вклад в общую погрешность при совмещении элементов межсоединений вносят как погрешности технологического оборудования, так и конструктивные параметры заготовки.

К технологическим погрешностям относятся:

- погрешности, вызванные способом совмещения: различают штифтовой способ (PIN-LAM), который подразумевает жесткую (внатяг) или нежесткую (слотовую) фиксацию пакета МПП при помощи штифтов; а также бесштифтовой способ (MAS-LAM) — совмещение с помощью оптической или рентгеновской системы компьютерного зрения [104];
- погрешности пробивки базовых отверстий;
- погрешности позиционирования обрабатывающего инструмента (например: луча в системах прямого лазерного экспонирования или сверла в системах сверления);

— износ фотошаблона или несоблюдение его условий эксплуатации и хранения и др.

Погрешности конструктивного характера преимущественно обусловлены деформацией слоев ПП в процессе их изготовления из-за высвобождения внутренних напряжений. Деформация может возникнуть:

- в процессе травления — селективное или полное снятие удерживающего базовый материал проводящего слоя;
- в процессе прессования — нагрев собранного пакета выше температуры стеклования под давлением.

Так, на величину деформации влияет: форма проводящего рисунка, баланс меди между слоями (разница между отношением площади проводников к общей площади печатной платы на разных слоях), толщина базового материала, толщина проводящего слоя, стиль плетения (при использовании композитных материалов) и сам стек ПП.

С учетом того, что: процесс совмещения является составляющей достаточно большого количества ТО производства ПП; на финальное качество изделия оказывает большое количество как конструктивных параметров изделия, так и ТО; то в качестве случайной величины, описывающей процесс совмещения выбран параметр несовпадения координат на заготовке с эталонным положением, определенным в проекте ПП.

#### **4.2 Обобщенная модель оценки вероятности выхода годной заготовки для процесса совмещения**

На основе сформированного требования к качеству изделия — обеспечении соответствия между результирующими координатами элементов проводящего рисунка и эталонными координатами, несовпадение координат можно описать в виде композиции несовпадения координат всех КП на заготовке. На рисунке 48 показана величина несовпадения координат для  $k$ -ой КП  $G_k$  при совмещении шаблона и заготовки в процессе фотолитографии, которую можно разделить на две



отдельные составляющие  $G_{x_k}$  и  $G_{y_k}$ , описывающие смещение по осям  $X$  и  $Y$  ( $O_k$  — эталонный центр  $k$ -ой КП,  $O_{ol_k}$  — центр КП после фотолитографии).

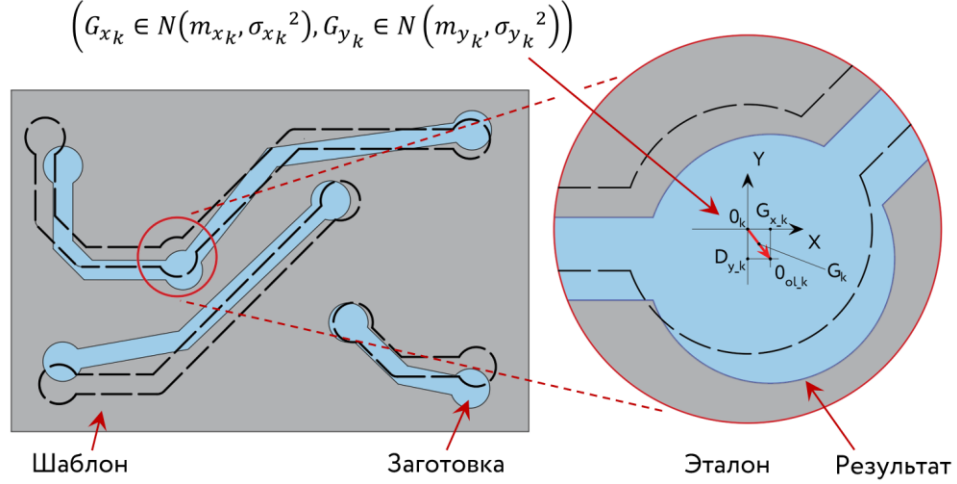


Рисунок 48 — Несовпадение координат на реальном шаблоне с эталоном (проектом ПП)

Аналогично рассмотренному процессу сверления (п. 3.2), можно считать, что несовпадение координат для  $k$ -ой КП  $D_k$  описывается двумерным нормальным распределением (46):

$$f_{pad_k}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x_k}\sigma_{y_k}\sqrt{1-\rho_k^2}} e^{\frac{-1}{2(1-\rho_k^2)} \left[ \frac{(x-m_{x_k})^2}{\sigma_{x_k}^2} - 2\rho_k \frac{(x-m_{x_k})(y-m_{y_k})}{\sigma_{x_k}\sigma_{y_k}} + \frac{(y-m_{y_k})^2}{\sigma_{y_k}^2} \right]}, \quad (46)$$

где,

- $f_{pad_k}(x, y)$  — функция плотности распределения величины несовпадения координат для  $k$ -ой КП  $G_k$ ;
- $m_{x_k}$  и  $\sigma_{x_k}$  — МО и СКО проекции смещения центра КП относительно эталона на ось  $X$ :  $G_{x_k} \in N(m_{x_k}, \sigma_{x_k}^2)$ ,  $k = \overline{1, K}$ ;
- $m_{y_k}$  и  $\sigma_{y_k}$  — МО и СКО проекции смещения центра КП относительно эталона на ось  $Y$ :  $G_{y_k} \in N(m_{y_k}, \sigma_{y_k}^2)$ ,  $k = \overline{1, K}$ ;
- $\rho_k = \frac{\text{cov}(G_{x_k}, G_{y_k})}{\sigma_{x_k}\sigma_{y_k}}$  — коэффициент корреляции между случайными величинами  $G_{x_k}$  и  $G_{y_k}$ ;
- $K$  — количество КП на слое ПП;

—  $\text{cov}(G_{x_k}, G_{y_k})$  — ковариация случайных величин  $G_{x_k}$  и  $G_{y_k}$ .

Так как нормальный закон является устойчивым, т. е. воспроизводящим себя при компонировании [105], то результирующее МО  $m_{x_k}$ , и СКО  $\sigma_{y_k}$  для величин  $G_{x_k}$  после нескольких технологических операций (ТО), определяются выражениями (47) и (48):

$$m_{x_k} = \sum_{j=1}^J m_{x_{k,j}}, \quad (47)$$

$$\sigma_{x_k} = \sqrt{\sum_{j=1}^J \sigma_{x_{k,j}}^2}, \quad (48)$$

где:

—  $m_{x_{k,j}}$  и  $\sigma_{x_{k,j}}$  — МО и СКО проекции смещения центра КП относительно эталона на ось  $X$  для  $j$ -ой технологической операции (ТО),  $j = \overline{1, J}$ ;

—  $J$  — количество ТО.

Аналогичные выражения могут быть получены для числовых характеристик величины  $G_{y_k}$ .

Накладывая ограничения на то, что смещения центра КП относительно эталона не зависят друг от друга на разных ТО, значение коэффициента корреляции  $\rho_k$  может быть выражено формулой (49):

$$\rho_k = \frac{\sum_{j=1}^J \rho_{k,j} \cdot \sigma_{x_{k,j}} \cdot \sigma_{y_{k,j}}}{\sigma_{x_k} \cdot \sigma_{y_k}}, \quad (49)$$

где  $\rho_{k,j}$  — коэффициент корреляции для  $k$ -ой КП на  $j$ -ой ТО.

На рисунке 49 представлена эволюция смещения центра КП в процессе изготовления ПП на этапах фотолитографии (вектор  $\overrightarrow{OO_{ol}}$ ), травления ( $\overrightarrow{O_{ol}O_{etch}}$ ) и прессования (векторы  $\overrightarrow{O_{etch}O_{press}}$  и  $\overrightarrow{OO_{press}}$  для разных КП), а также результат, полученный после операции сверления (смещение центра отверстия — вектор  $\overrightarrow{OO_{drill}}$ ).

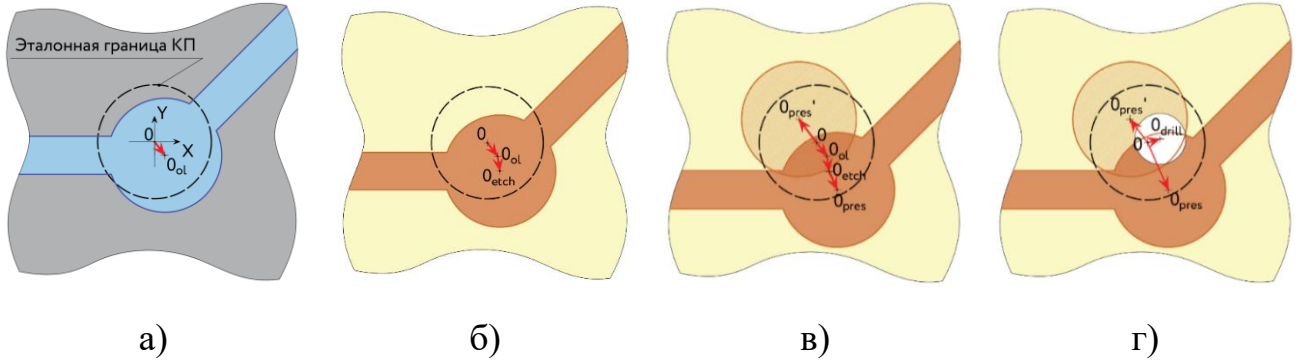


Рисунок 49 — Эволюция смещения центра КП в процессе изготовления печатной платы: а) фотолитография; б) травление; в) прессование; г) сверление

Считая ошибку позиционирования отверстия при сверлении несмещенной случайной величиной относительно эталонного положения КП, разброс, привносимый на операции сверления также может быть описан, как составляющая процесса совмещения со своими параметрами  $\sigma_{xk,drill}$ ,  $\sigma_{yk,drill}$ ,  $\rho_{k,drill}$ . Условия выхода годной КП для заготовки в таком случае эквивалентны рассмотренным ранее для процесса сверления, т. е. вероятность выхода годной заготовки на операции совмещения — вероятность  $P_{pad}$  того, что все отверстия попадут в область допустимого смещения центра отверстия относительно центра КП  $Z_{ik}$ ,  $Z'_{ik}$  или  $Z''_{ik}$  (вид области зависит от вида от вида КП, см. п.3.3,  $i$  — класс применения изделия,  $k$  — номер КП), только в этом случае происходит смещение как КП, так и переходных отверстий.

Предполагая, что случайные величины  $G_{xk1}$ ,  $G_{xk2}$ , и  $G_{yk1}$ ,  $G_{yk2}$  независимы ( $k1, k2$  — номера КП,  $k1 \neq k2$ ), тогда вероятность успешного совмещения слоя  $P_{pad}$  — произведение вероятностей успешного попадания отверстий для каждой КП  $P_{pad_k}$  (50):

$$P_{pad} = \prod_{k=1}^K P_{pad_k} = \prod_{k=1}^K \iint_{(z_{ik})} f_{pad_k} dx dy, \quad (50)$$

где  $z_{ik}$  — граница области допустимого смещения центра отверстия относительно центра  $k$ -ой КП  $i$ -го класса применения.

В случае, если рассматривается совмещение нескольких слоев между собой (для МПП),  $K$  (количество КП на заготовке) — сумма КП на всех отдельных слоях, т. е.  $K$  увеличивается с количеством слоев.

Разработанная модель предполагает оценку вероятности выхода годной заготовки как совокупную вероятность выхода годных КП. Однако, числовые характеристики законов распределения смещения относительно эталонного положения могут варьироваться от одной КП к другой. Так, в работе Ю.Б. Цветкова [106] изложен метод контроля совмещаемости топологических слоев, который состоит в разложении рассовмещений на отдельные составляющие, каждая из которых характеризует влияние того или иного фактора или их совокупностей (Рисунок 50). Основой для дифференцированной оценки отдельных составляющих являются математические модели погрешностей совмещения, описывающие распределение погрешностей по полю топологического слоя. Рассовмещение в каждой точке платы представляется в виде совокупности составляющих: смещения, неортогональности, углового разворота, растяжения или сжатия и случайных факторов. От точки к точке рассовмещение будет изменяться систематическим образом и, если найти способ выделять в измеренных рассовмещениях отдельные составляющие, то можно определить способы для их устранения.

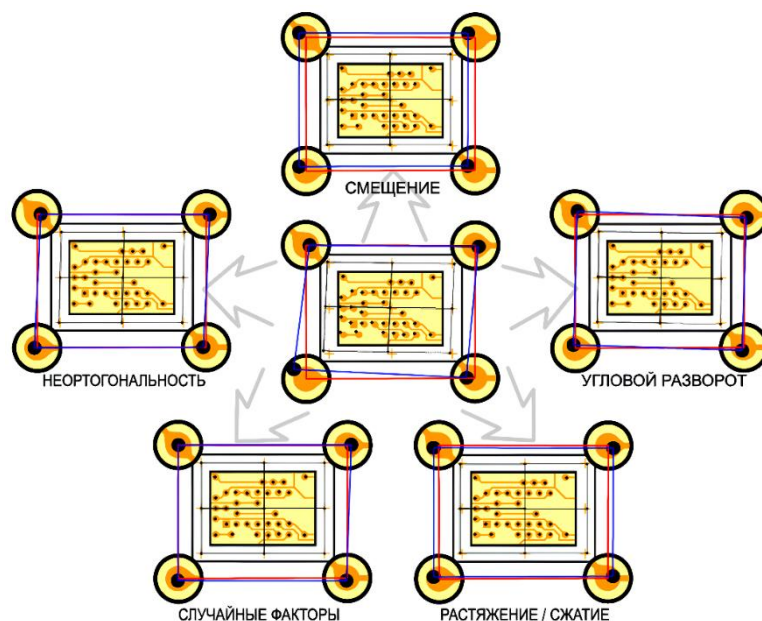


Рисунок 50 — Декомпозиция погрешностей совмещения на ПП

По сути, предложенный метод предполагает, что отклонение положения относительно эталона по осям для каждой контактной площадки определяется не только величиной разброса (СКО), но и ненулевым МО, которое неслучайно и может быть измерено и компенсировано.

Выдвинутое предположение может быть проиллюстрировано на примере совмещения шаблона и заготовки на операции фотолитографии, приведенном на рисунке 51. На шаблоне находятся КП с одинаковыми параметрами разброса по осям, однако на шаблоне присутствует искажение, из-за которого топология сжата по горизонтальной оси (на рисунке изображены только контактные площадки по краям платы). Несмотря на то, что выборочное среднее смещений по всем КП будет стремиться к нулю, выборочное СКО будет таким, чтобы эллипс рассеивания (Рисунок 51, красные области) включал все эллипсы рассеивания реальных смещений (Рисунок 51, зеленые области). В таком случае формируется заниженная оценка точности технологической операции, что влечет за собой завышенные требования к размерам топологического рисунка для воспроизведения печатных плат, а также отсутствие информации о возможном улучшении качества процесса.

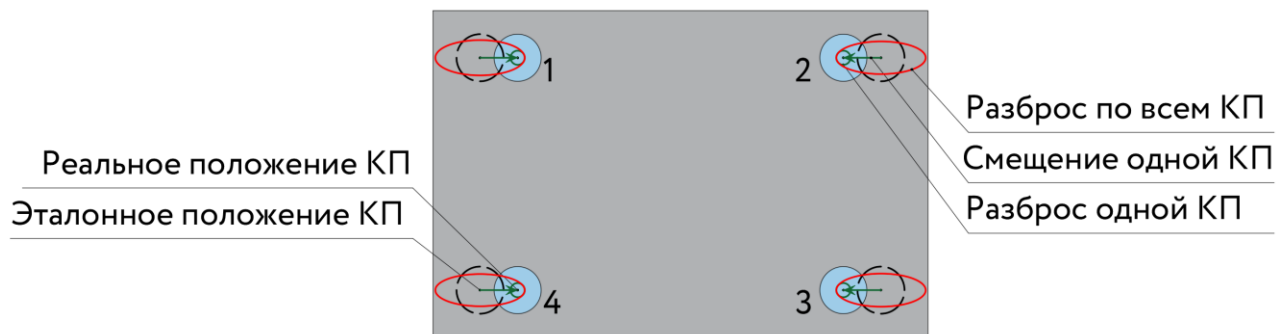


Рисунок 51 — Разница в определении параметров закона распределения смещения КП при рассмотрении каждой КП отдельно (зеленые элементы) и всех в совокупности (красные элементы) для случая смещения, вызванного сжатием шаблона по горизонтальной оси

Таким образом, отдельно рассматривая операцию совмещения, актуальной задачей является построение векторной карты средних смещений по площади ПП, а также их компенсация.

### 4.3 Программно-аппаратный комплекс экспонирования для экспериментального исследования операции совмещения

Для экспериментального исследования операции совмещения и определения ее влияния на вероятность выхода заготовки, удовлетворяющей требованиям приемки, выбрана операция совмещения заготовки и шаблона в процессе фотолитографии. Выбор операции обусловлен тем, что на нем возможно путем изменения шаблона топологии не только компенсировать постоянную составляющую искажений, но и внести корректирующие воздействия их компенсации.

В настоящее время на предприятиях, производящих ПП используются две принципиально разные технологии экспонирования (Рисунок 52), которые определяют используемый тип совмещения: контактное экспонирование и прямое экспонирование [85].

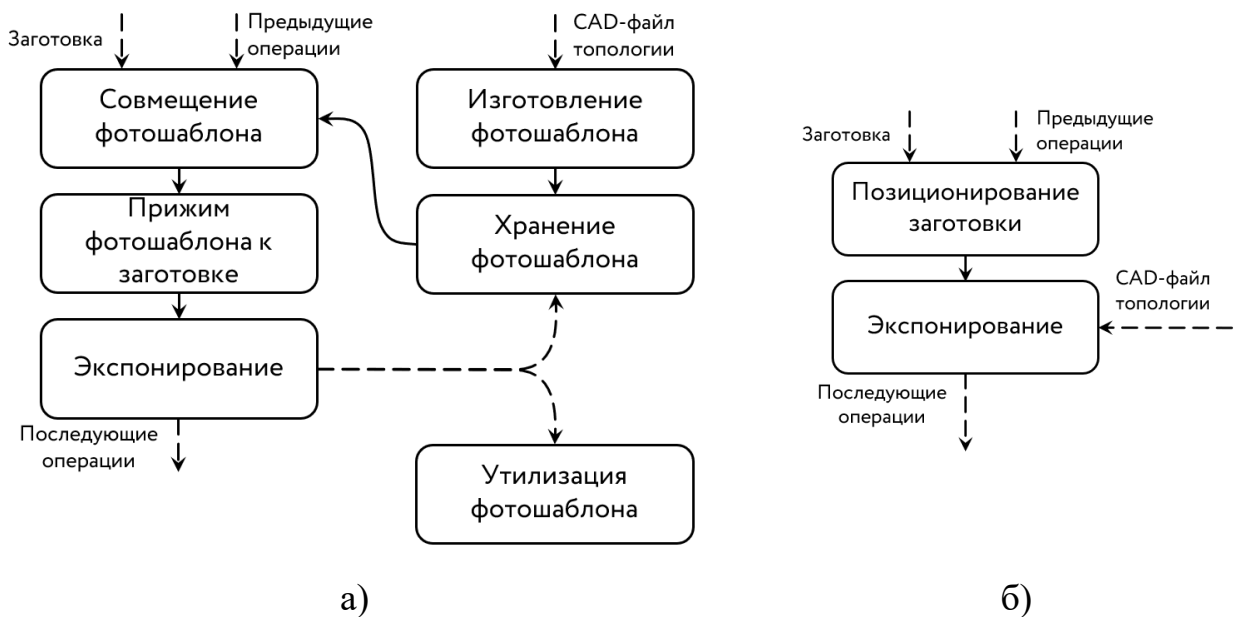


Рисунок 52 — Блок-схемы процессов экспонирования ПП: а) контактное экспонирование; б) прямое экспонирование

Вводить корректирующие воздействия в процесс контактного экспонирования нерационально преимущественно по причине использования пленочных фотошаблонов (Рисунок 52а):

- непосредственно перед экспонированием фотошаблон проходит вспомогательные операции изготовления, хранения, совмещения с

- заготовкой и прижима к заготовке для обеспечения плотного контакта — каждая из операций, в свою очередь, является источником дефектов на самом фотошаблоне и, как следствие, на конечном продукте;
- использование пленочных фотошаблонов предполагает дополнительные расходы на оборудование для его изготовления, организацию места для их хранения с соблюдением требуемых условий, а также на утилизацию;
- изменение рисунка возможно только путем повторного изготовления фотошаблона, что затрудняет возможности по оперативному редактированию рисунка;
- влияние окружающей среды на фотошаблон, который изменяет свои линейные размеры при изменении температуры и влажности, изнашивается по мере использования, что приводит искажению переносимого рисунка.

Установки прямого экспонирования (Рисунок 52б) осуществляют перенос рисунка лазерным лучом в соответствии со сформированной по производственному файлу управляющей программой. Они лишены недостатков систем контактного экспонирования, но обладают другими:

- высокая стоимость оптической системы;
- зависимость точности воспроизведения рисунка от размера пятна лазерного луча и механической системы, осуществляющей отклонение этого луча;
- наиболее пологая кривая распределения энергии излучения, что влечет за собой наибольшее паразитное засвечивание фоторезиста и, как следствие, снижение точности воспроизводимого рисунка [5].

В настоящее время крупные предприятия, производящие ПП, стараются осуществить переход на технологию прямого экспонирования, в то время как на малых предприятиях она не так распространена из-за высокой стоимости. Исходя из растущих потребностей промышленности в производстве и усовершенствовании технологических процессов встает вопрос о возможности создания технологии, которая будет сочетать в себе преимущества технологий как прямого, так и контактного экспонирования: отсутствие пленочных фотошаблонов; возможность изменения размеров проводящего рисунка; простота совмещения

проводящего рисунка и заготовки; отсутствие сложной оптической системы и, как следствие, низкая стоимость установки.

#### 4.3.1 Конструкция установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы

Схожий с экспонированием процесс также встречается в 3D печати, а именно в технологии масочной стереолитографии (Mask Stereolithography, MSLA) [107]. В MSLA технологии используется оптическая система, состоящая из источника ультрафиолетового (УФ) излучения и жидкокристаллической (ЖК) матрицы. На экран последовательно поступает изображение слоев изготавливаемой модели. Жидкая фотополимеризующая композиция затвердевает под действием УФ света. Затем движущаяся платформа с сформированным на ней слоем поднимается выше для полимеризации следующего слоя (Рисунок 53).

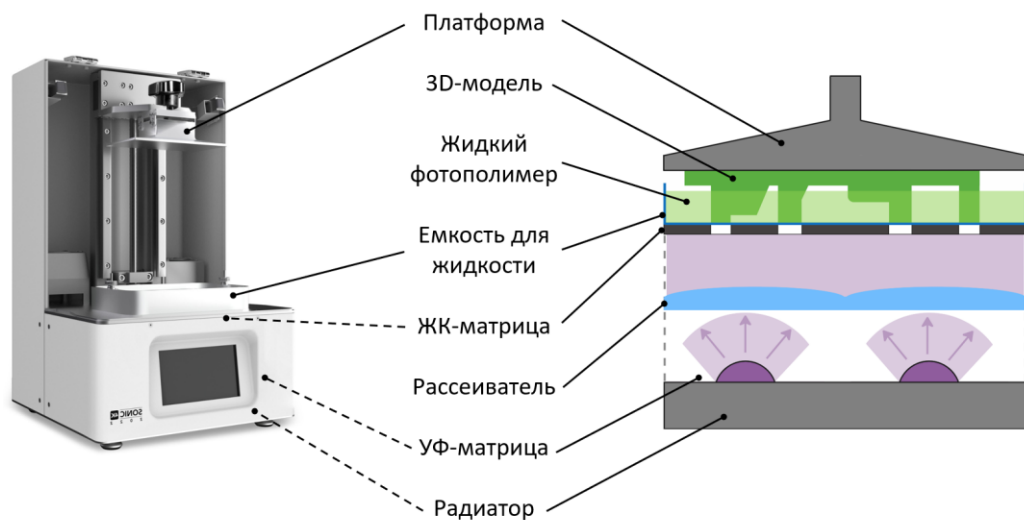


Рисунок 53 — MSLA-технология 3D-печати

Таким образом, MSLA 3D-принтеры обеспечивают селективную полимеризацию, что позволяет сделать предположение о возможности использования данного принципа при экспонировании светочувствительного материала при производстве ПП: воздействовать на заготовку УФ-светом, проходящим через ЖК-матрицу, на которой находится изображение проводящего рисунка. На основе вышеизложенной технологии разработана структурная схема системы экспонирования с использованием ЖК-матрицы (Рисунок 54).



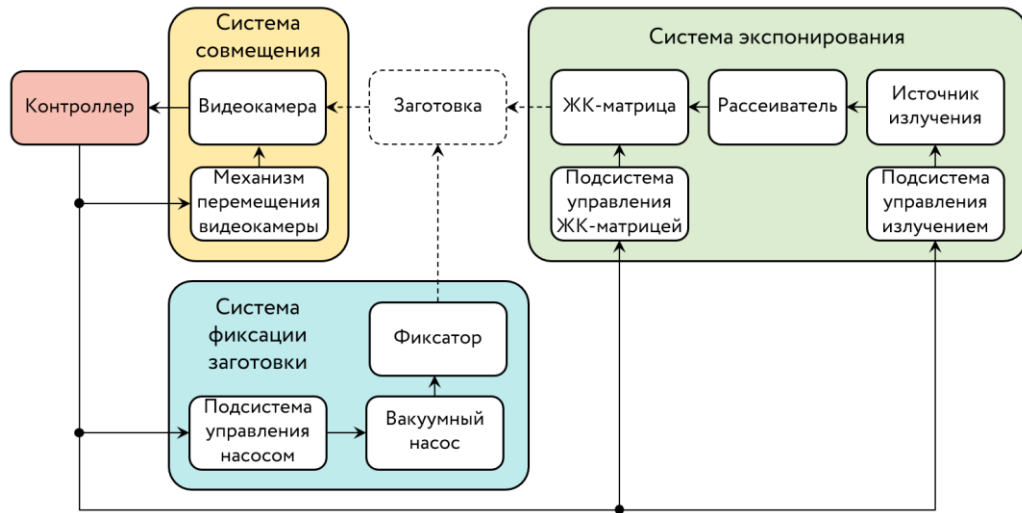


Рисунок 54 — Структурная схема установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы

Основные элементы установки прямого экспонирования с использованием ЖК-матрицы:

- Контроллер, обеспечивающий: преобразование производственного файла слоя заготовки изображение, пригодное для корректного отображения на ЖК-матрице; совмещение шаблона и заготовки по полученному с видеокамеры изображению; расчет и внесение корректировок в шаблон в соответствии с параметрами ТП; регулировку положения камеры; формирование управляющих команд для систем фиксации и экспонирования.
- Система экспонирования, которая осуществляет перенос рисунка на заготовку и включает в себя две подсистемы управления: ЖК-матрицей и источником излучения (матрицы, составленных из светодиодов УФ спектра). Подсистема управления ЖК-матрицей получает от управляющей программы контроллера скорректированное изображение проводящего рисунка в соответствии с положением заготовки на рабочем поле. Подсистема управления излучением по команде управляющей программы обеспечивает необходимое время экспонирования, а также управляет режимом работы УФ-матрицы. Также между УФ и ЖК-матрицами необходимо наличие рассеивателя, обеспечивающего параллельность УФ-лучей и, соответственно, равномерную экспозицию заготовки по площади.

- Система совмещения, реализующая контур обратной связи о положении заготовки на рабочем поле ЖК-матрицы. Система совмещения состоит из видеокамеры, которая передает на контроллер изображение рабочего поля заготовки, а также механизма перемещения видеокамеры для регулировки ее области видимости.
- Система фиксации обеспечивает плотный контакт между ЖК-матрицей и заготовкой в процессе экспонирования, обеспечивающую вакуумный прижим заготовки к ЖК-матрице. Заготовка с нанесенным фоточувствительным материалом располагается на ЖК матрице, а сверху накрывается держателем, выполненным из прозрачной полимерной пленки. Затем между матрицей и пленкой с помощью вакуумного насоса создается разрежение, прижимающее заготовку к ЖК-матрице.

На основе структурной схемы (Рисунок 54) разработана конструкция модуля экспонирования, представленная на рисунке 55.

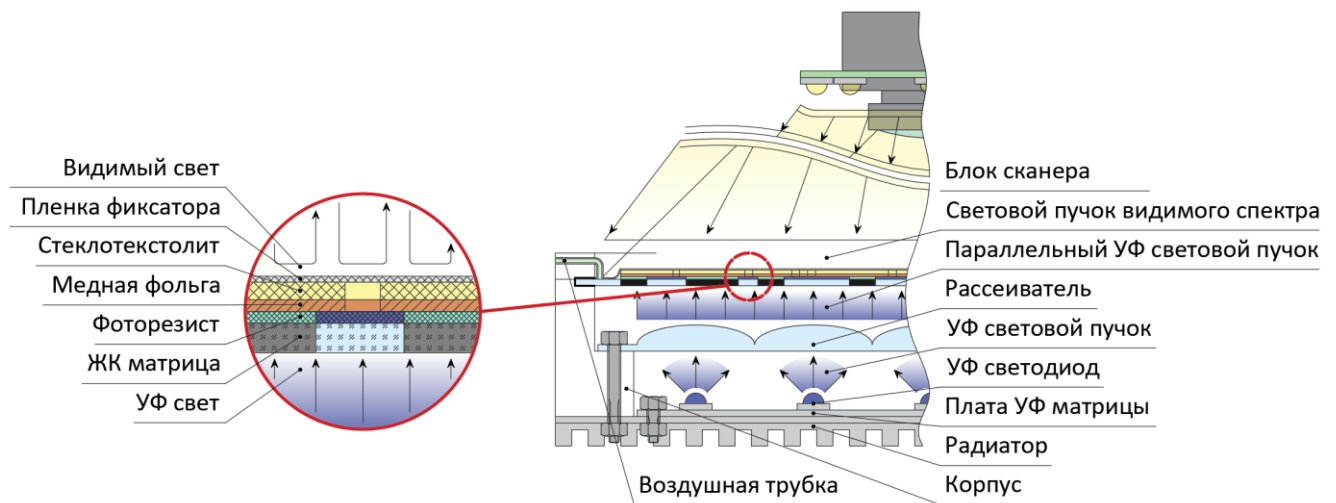


Рисунок 55 — Конструкция модуля экспонирования

Алгоритм работы с установкой включает в себя следующие операции:

- 1) Оператор помещает заготовку с нанесенным фоторезистом на ЖК-экран и накрывает ее сверху рамкой с фиксирующей пленкой.
- 2) Затем обеспечивается необходимое прижатие заготовки путем откачки воздуха и осуществляется съемка верхней стороны заготовки.

- 3) На основе результатов съемки производится совмещение изображения проводящего рисунка с заготовкой, а затем с помощью информации о параметрах ТП вводятся компенсирующие искажения.
- 4) На последнем этапе изображение выводится на ЖК-матрицу, источник излучения включается на необходимое время с последующим выключением и снятием заготовки.

Предложенные структурная схема, конструкция и алгоритм работы в общем виде описывают возможность применения ЖК-матрицы для экспонирования ПП [30] (Приложение Б, Рисунок Б.4). Однако остается большое количество частных вопросов, касающихся конструкции установки, технологических параметров операции и принципиальной работоспособности технологии. Таким образом, возникает необходимость в экспериментальной апробации технологии, для которой разработан лабораторный образец установки экспонирования (Рисунок 56).

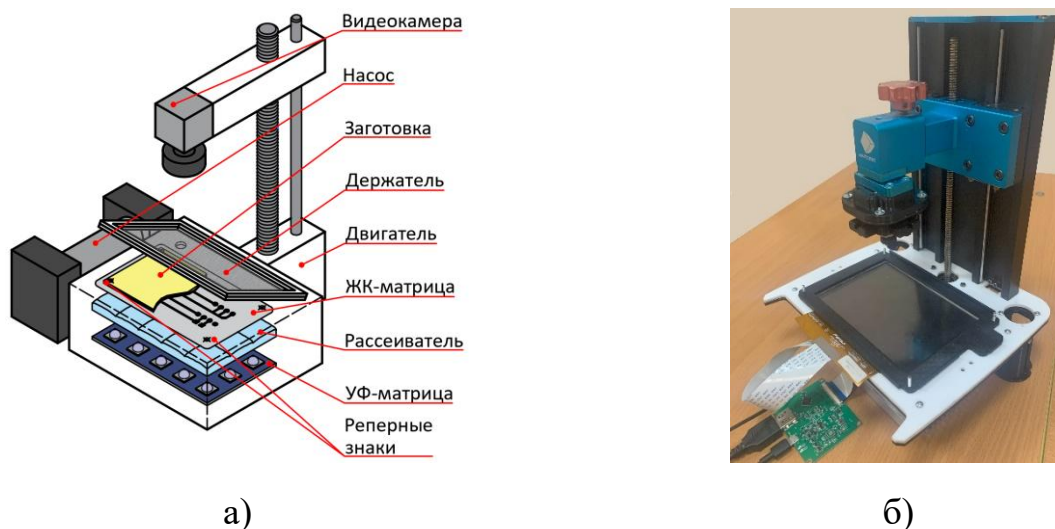


Рисунок 56 — Прототип разработанной установки экспонирования: а) схема; б) фотография

Основными составляющими модуля являются:

- ЖК-матрица — монохромная матрица «Pengji PJ3D623V1» разрешением  $3840 \times 2400$  пикселей и размером рабочей области  $134,4 \times 84$  мм (размер пиксела:  $35 \times 35$  мкм), на которую выводится изображение проводящего рисунка, и которая является рабочем полем установки;

- УФ-матрица — выполняющая функцию подсветки ЖК-матрицы и обеспечивающая экспонирование слоя ПП (15 светодиодов, ток потребления: 2 А);
- рассеиватель — набор линз, используемых для обеспечения параллельности УФ-лучей, исходящих от УФ-матрицы, для достижения равномерной экспозиции;
- держатель — пластиковая рамка с натянутой на нее матовой пленкой, используется для прижима заготовки к поверхности ЖК-матрицы для уменьшения зазора «ЖК-матрица — Заготовка» и, следовательно, уменьшения паразитной засветки на границах проводников;
- видеокамера — элемент обратной связи установки; в качестве сенсора используется модуль «Sony IMX298» с возможностью настройки разрешения через стороннее программное обеспечение; установленное разрешение составляет  $3264 \times 2448$  пикселей;
- подсветка — набор светодиодов белого цвета, установленный рядом с видеокамерой, для освещения заготовки; для обеспечения одинаковых условий освещенности использование установки предполагается с непрозрачным кожухом, исключая постороннее освещение от внешних источников света.

Высота  $h_{cam}$  видеокамеры относительно ЖК-матрицы (Рисунок 57) определена по формуле (51):

$$h_{cam} = \max \left( \frac{L_X}{2tg(\varepsilon_{cam}/2)}; \frac{L_Y}{2tg(\varepsilon_{cam}/2)} \right), \quad (51)$$

где:

- $L_X, L_Y$  — размер рабочей области ЖК-матрицы: 134,4 и 84 мм;
- $\varepsilon_{cam}$  — угол обзора видеокамеры ( $86^\circ$  по обеим осям).

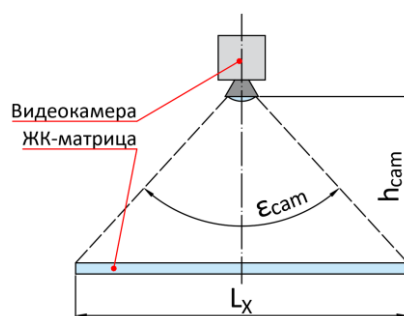


Рисунок 57 — Определение высоты видеокамеры над рабочим полем установки (ЖК-матрицей)

Выражение (51) задает минимальную высоту, при которой ЖК-матрица поместится на изображении с камеры. Требуемая высота по двум осям составляет 72 и 44 мм. Из двух полученных значений выбрано максимальное значение. с учетом запаса, значение высоты камеры над ЖК-матрицей составляет 75 мм. Модуль вертикального перемещения позволяет увеличить качество изображения с камеры путем подстройки положения и фокуса видеокамеры под размеры заготовки.

#### 4.3.2 Режим работы установки экспонирования

Для проверки работоспособности как прототипа, так и самого способа экспонирования с использованием ЖК-матрицы в качестве шаблона проведена серия экспериментов, в ходе которых произведена визуальная оценка качества операции экспонирования в зависимости от времени экспонирования, а также от длины волны УФ-излучения  $\lambda \in \{365, 385, 395\}$ .

Для первичного определения диапазона варьирования времени экспонирования область фоторезиста разделена на 10 секций (Рисунок 58), каждая из которых имеет свое время экспонирования (в секундах): 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75, 90 и 120. Сначала на ЖК-экран выводился полностью прозрачный шаблон в течение 10 с. Затем выводился шаблон, с одной непрозрачной секцией еще на 5 с, далее — с двумя еще на 5 с и т. д. Таким образом последовательно закрывались секции экспонирования от минимального времени к максимальному. Затем производилось сравнение цвета проэкспонированного фоторезиста с эталонным образцом —заготовкой с засвеченным фоторезистом на установке контактного экспонирования Bungard Hellas.

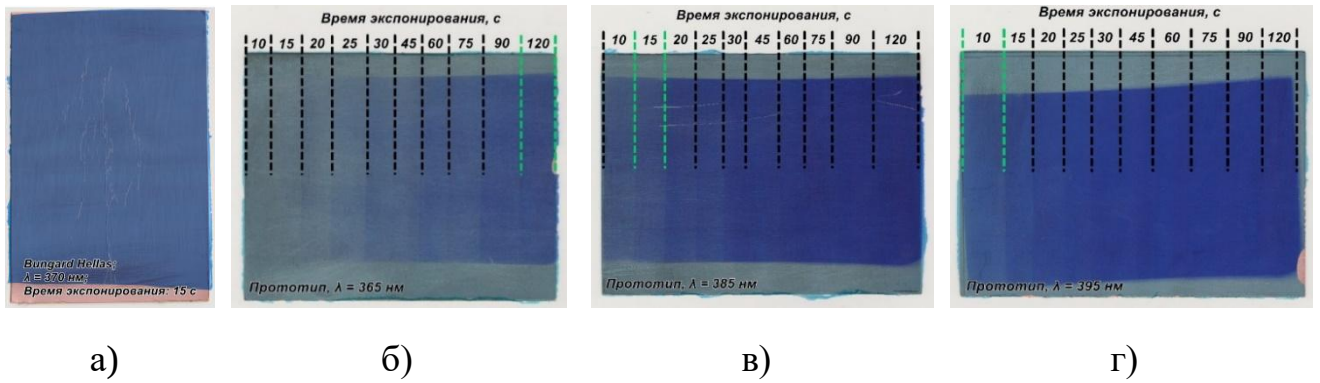


Рисунок 58 — Изменение цвета фоторезиста в зависимости от времени экспонирования  $t_{exp}$  а) эталон; б – г) результаты, полученные на экспериментальном образце (длина волны  $\lambda$ : 365 нм, 385 нм и 395 нм)

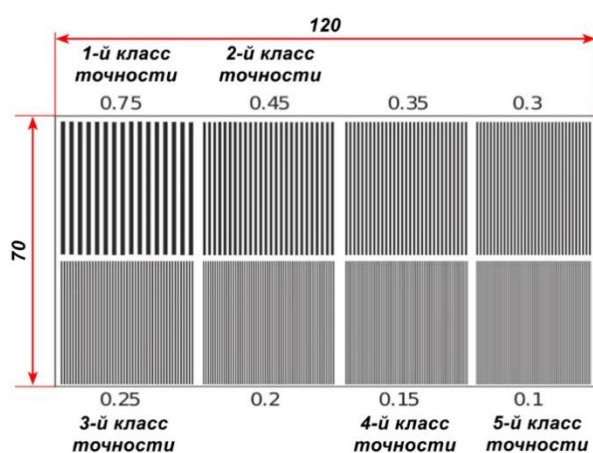
Зеленым пунктиром на рисунке 58 отмечены те секции, которые совпали по тону с эталоном. При использовании светодиодной матрицы с длиной волны 365 нм начиная с времени экспонирования в 20 с отчетливо видны секции и границы между ними, а совпадение цвета наблюдается в конце исследуемого диапазона при времени экспонирования в  $T(\lambda = 365) = 120$  с. На светодиодных матрицах 385 и 395 нм совпадение цвета наблюдается при времени экспонирования  $T(\lambda = 385) = 15$  с и  $T(\lambda = 395) = 10$  с соответственно. Большая часть секций имеют цвет темнее, чем у эталона, что говорит об избыточном времени экспонирования.

Проведенный эксперимент позволил определить начальное приближение для поиска требуемого времени экспонирования с использованием прототипа, которое может быть уточнено. Для этого: создана тестовая топология (Рисунок 59а), содержащая участки, соответствующими разным классам точности (от первого до пятого) по ГОСТ Р 53429–2009 [72]; задан шаг изменения времени экспонирования  $\Delta = \frac{T(\lambda)}{4}$  с округлением до целого числа и задан диапазон изменения времени для каждой длины волны от  $T(\lambda) - 2\Delta$  до  $T(\lambda) + 2\Delta$ . Полученные результаты эксперимента представлены в таблице 6. Результаты экспонирования для наборов параметров, обеспечивающих наименьшую воспроизводимую ширину фоторезистивной маски для УФ-матриц с различной длиной волны  $\lambda$ , приведены на рисунках 59а–в.

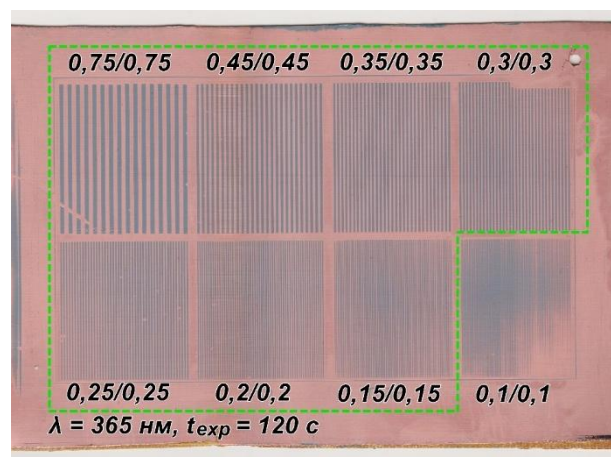


Таблица 6 — Воспроизводимость проводников в зависимости от длины волны источника излучения  $\lambda$  и времени экспонирования  $t_{exp}$

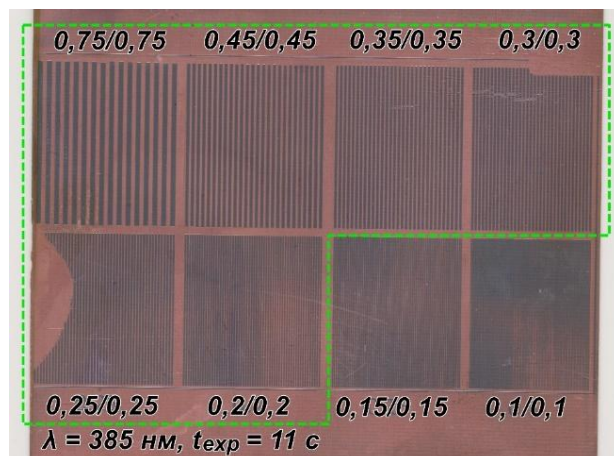
|                                   |                                                            |      |     |      |      |      |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------|------|-----|------|------|------|
| Длина волны<br>$\lambda = 365$ нм | Время экспонирования $t_{exp}$ , с                         | 60   | 90  | 120  | 150  | 180  |
|                                   | Минимальная воспроизводимая ширина проводника и зазора, мм | 0,3  | 0,2 | 0,15 | 0,2  | 0,25 |
| Длина волны<br>$\lambda = 385$ нм | Время экспонирования $t_{exp}$ , с                         | 7    | 11  | 15   | 19   | 23   |
|                                   | Минимальная воспроизводимая ширина проводника и зазора, мм | 0,25 | 0,2 | 0,25 | 0,25 | 0,3  |
| Длина волны<br>$\lambda = 395$ нм | Время экспонирования $t_{exp}$ , с                         | 4    | 7   | 10   | 13   | 16   |
|                                   | Минимальная воспроизводимая ширина проводника и зазора, мм | 0,35 | 0,2 | 0,25 | 0,3  | 0,35 |



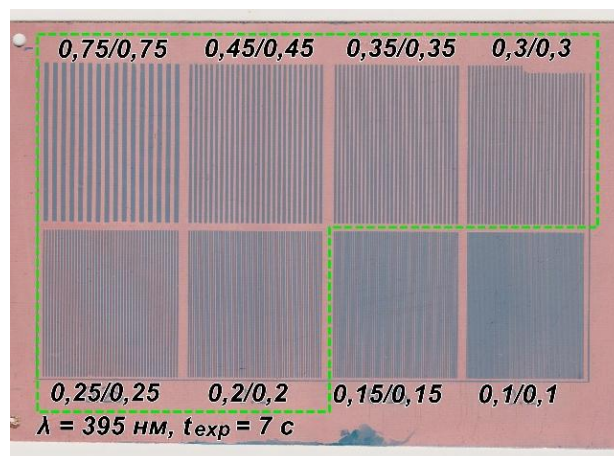
а)



б)



в)



г)

Рисунок 59 — Эксперимент по определению воспроизводимости проводников на этапе фотолитографии (числами рядом с проводниками обозначена ширина проводника и зазора между проводниками в мм): а) позитивный фотошаблон; б – г) результаты эксперимента при  $\lambda = 365$  нм и  $t_{exp} = 120$  с,  $\lambda = 385$  нм и  $t_{exp} = 11$  с,  $\lambda = 395$  нм и  $t_{exp} = 7$  с соответственно (зеленым пунктиром обведены ячейки с удовлетворительными результатами)

Наименьшая воспроизводимая ширина маски получена при  $\lambda = 365$  нм при времени экспонирования 120 с. При такой конфигурации удалось изготовить топологию, соответствующую четвертому классу точности по ГОСТ Р 53429–2009 [72] с шириной проводника и зазора 0,15 мм. Матрицы с длиной волны 385 и 395 нм показали одинаковую воспроизводимость проводников до 0,2 мм при времени экспонирования 11 с и 7 с соответственно.

Таким образом, эксперимент позволил подтвердить принципиальную работоспособность предложенной технологии экспонирования. Любая из рассмотренных УФ-матриц применима в установке. Однако, несмотря на рекомендуемую длину волны экспонирования в диапазоне от 360 до 385 нм для используемого фоторезиста, светодиодная матрица с длиной волны 365 нм обладает малой мощностью экспонирования по сравнению с матрицами, что существенно увеличивает время операции. с другой стороны, увеличенное время экспонирования для матрицы с длиной волны 365 нм позволило добиться лучшей воспроизводимости проводящего рисунка за счет уменьшения влияния разброса времени экспозиции. Тогда, лучшим вариантом для дальнейшего применения является использование матрицы с длиной волны 395 нм с автоматическим контролем времени экспонирования.

Далее произведен анализ дефектов на образце, полученного с применением 365 нм УФ-матрицы и временем экспонирования 120 с (Рисунок 60).

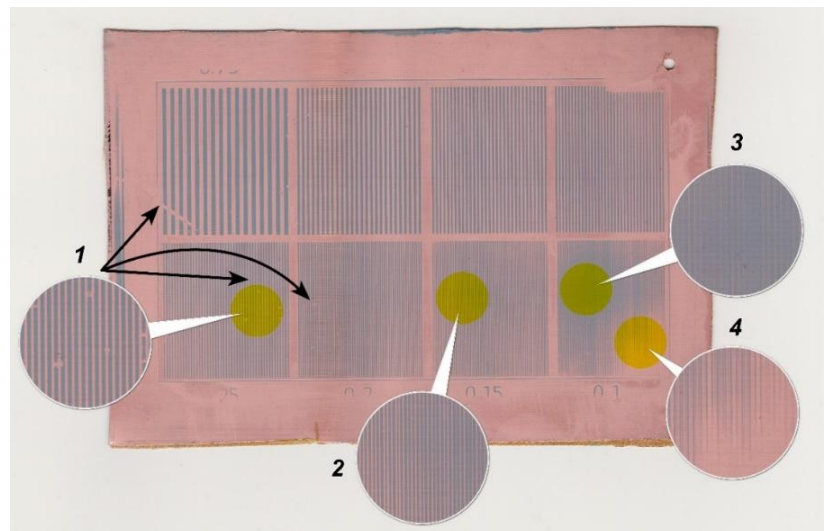


Рисунок 60 — Виды дефектов на заготовке после фотолитографии на разработанном прототипе установки



Выявлено наличие отслаивающихся кусков фоторезиста из-за некачественной дезоксидации поверхности заготовки и, как следствие, низкой адгезии между фоторезистом и заготовкой (Рисунок 60, 1). Сужение зазора между дорожками из-за неравномерности излучения произошло по причине грубого определения расстояния от рассеивателя до ЖК-экрана, что послужило причиной недостаточно равномерного излучения (Рисунок 60, 2). Одновременное частичное отсутствие фоторезиста (Рисунок 60, 4) и наличие переотвержденного фоторезиста (Рисунок 60, 3, наличие перемычек из фоторезиста между линиями проводников) вызвано разным расстоянием от заготовки до ЖК матрицы, что является следствием неплотного прилегания заготовки.

В результате анализа можно сделать выводы, что причиной полученных дефектов являются либо другие ТО, либо недостатки конструкции экспериментального образца, которые возможно устранить. Однако, также выявлена проблема, присущая самой технологии — неравномерная экспозиция фоторезиста по площади заготовки. Главной причиной этого явления является основной элемент оптической системы установки — рассеиватель, который не обеспечивает достаточной равномерности излучения (Рисунок 61а).

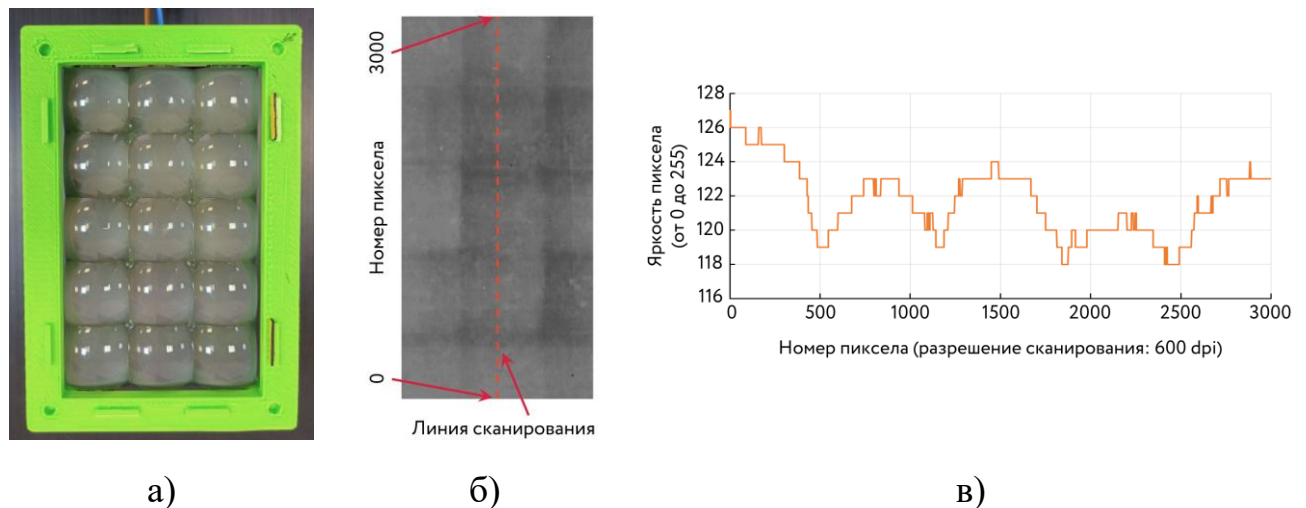


Рисунок 61 — Определение причины неравномерной экспозиции фоторезиста: а) рассеиватель УФ излучения; б) полутоновое изображение фоторезиста после экспонирования; в) зависимость яркости пиксела на линии сканирования от его положения на линии сканирования

Для подтверждения выдвинутого предположения произведено экспонирование образца фоторезиста и его сканирование с преобразованием в

полутоновый формат (8 бит). На полученном изображении (Рисунок 61б) выделена горизонтальная линия, для которой определена зависимость яркости пиксела от его положения на прямой (Рисунок 61в). По рисункам 61а–в видно, что характер неравномерности яркости пикселей совпадает с формой рассеивателя, что определяет необходимость поиска способа компенсации неравномерности излучения.

#### **4.3.3 Методика масочной компенсации неравномерности излучения в системе прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы**

Для компенсации неравномерности излучения УФ-света рассмотрены следующие методы:

- 1) Добавление механических перемещений источника излучения с рассеивателем относительно ЖК матрицы для того, чтобы пучок света менял свое положение относительно последней (Рисунок 62а). Этот метод требует существенной модернизации конструкции установки, а также определения параметров колебаний: амплитуды и частоты вибрации. Также создаваемая вибрация может негативно сказаться на сроке службы установки.
- 2) Увеличение расстояния между рассеивателем и источником света (Рисунок 62б). В таком случае из-за того, что свет из рассеивателя не является полностью коллимированным, то при увеличении расстояния до ЖК матрицы область излучения от одного светодиода увеличится, что уменьшит неравномерность. Однако увеличение расстояния между линзой и ЖК-матрицей целесообразно до некоторого предела, так как количество поглощенной фоторезистом энергии обратно пропорционально расстоянию, что влечет за собой увеличение требуемого времени экспонирования.
- 3) Формирование на экране изображения шаблона, выравнивающего интенсивность проходящего света через ЖК-матрицу за счет использования всего диапазона изменения яркости пиксела, а не только его граничных значений: прозрачного и черного (Рисунок 62в). Метод не

требует конструктивных изменений установки и не влияет на параметры ТП, но требует определения изображения компенсирующей маски.

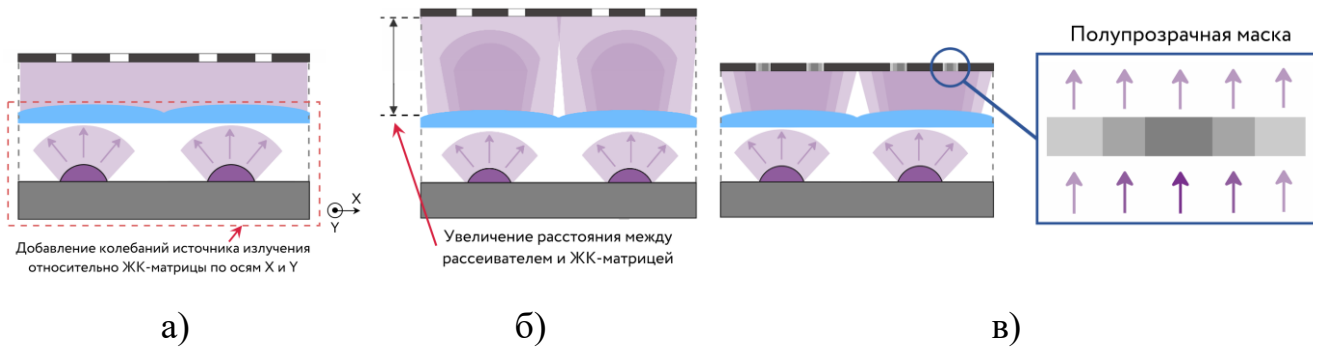


Рисунок 62 — Способы компенсации неравномерности излучения для установки экспонирования: а) добавление колебаний; б) увеличение расстояния; в) добавление полутоновой маски

Наиболее предпочтительным является последний вариант с применением маски, так как его использование не требует внесения изменений ни в конструктивные, ни в технологические параметры установки. Однако его использование требует создания изображения полутоновой маски, получение которой возможно лишь путем получения количественной оценки неравномерности излучения.

С учетом небольших размеров рабочего поля собранного прототипа (134,4×84 мм) оценку неравномерности излучения целесообразно проводить путем его сканирования, однако серия пробных экспериментов с использованием многофункционального устройства HP Deskjet 5520 опровергла возможность использования этого способа по ряду причин:

- 1) невосприимчивость чувствительного элемента сканера к свету УФ-диапазона;
- 2) засветка изображения встроенной подсветкой сканера. Выключение подсветки невозможно программными методами, а при ее маскировании непрозрачной пленкой съем изображения происходит некорректно.

Также определить неравномерность излучения можно путем измерения энергии, проходящей через ЖК-матрицу в различных ее точках с помощью специальных счетчиков, например, Linshang LS125, но чувствительный элемент таких счетчиков имеет достаточно большие размеры (диаметр отверстия для

измерений от 1 до 10 мм). Поэтому этот способ применим только для грубой оценки неравномерности излучения и не подходит ее компенсации.

Для исследования неравномерности излучения предложен другой способ (Рисунок 63), который основан на оценке изменения цвета фоторезиста в зависимости от прозрачности полутонной маски, сформированной на ЖК-матрице. В данном случае изменение цвета фоторезиста является косвенным параметром, зависящим от поглощённой им энергии, который можно измерить с помощью сканера.

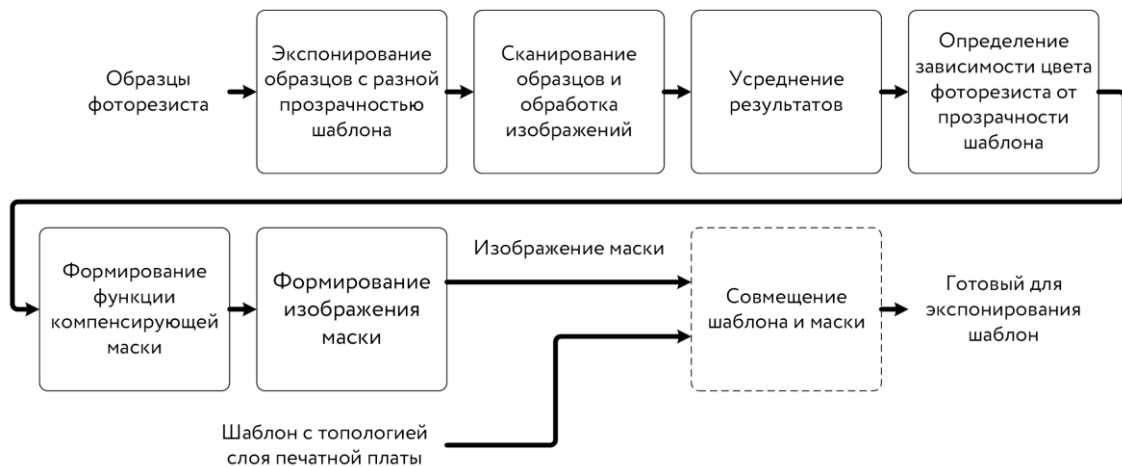


Рисунок 63 — Методика формирования и применения компенсирующей маски

Тогда, для устранения неравномерности УФ излучения на шаблон необходимо наложить дополнительную полупрозрачную маску на участки, которые имеют более темный оттенок цвета фоторезиста. Прозрачность маски должна быть подобрана таким образом, чтобы после экспонирования в каждой точке рабочего поля оттенок цвета фоторезиста был одинаковый и совпадал самой светлой его частью.

Таким образом, для коррекции распределения УФ излучения необходимо определить зависимость цвета фоторезиста от прозрачности маски. Данную зависимость можно получить экспериментально путем экспонирования фоторезиста при различных фиксированных значениях прозрачности маски и времени операции. Для проведения экспериментов выбраны следующие значения прозрачности маски: 100 % (полностью прозрачная маска), 87,5 %, 75 %, 62,5 %, 50 % (полупрозрачная маска).

Оценка цвета фоторезиста осуществлена путем его сканирования: разрешение — 1200 dpi, формат — TIFF, цветовое пространство — RGB, глубина цвета — 8 бит. Тогда оттенок фоторезиста определяется совокупностью яркостей красной, зеленой и синей составляющих пиксела от 0 до 255, где 0 соответствует темному оттенку, а 255 — светлому. Сами эксперименты проведены на лабораторном стенде с УФ светодиодной матрицей, которая имеет длину волны 405 нм, время экспонирования выбрано равным 45 секундам, так как при таком времени наблюдается значительное визуальное изменение цвета фоторезиста.

После получения выборки изображений фоторезиста произведена их компьютерная обработка (Рисунок 64): устранение шумов фильтром Гаусса с ядром  $9 \times 9$  пикселей и выравнивание изображений между собой: с помощью рамки и реперных знаков на маске достигнуто одинаковое положение исследуемой области на изображении с ее последующим вырезанием.



Рисунок 64 — Алгоритм обработки изображений для определения изменения цвета фоторезиста в зависимости от времени экспонирования

На последнем этапе обработки изображений произведено усреднение изображений по соответствующим уровням прозрачности примененной маски (на каждый уровень прозрачности изготовлено по 10 образцов) для минимизации влияния дефектов на фоторезисте (Рисунок 65).

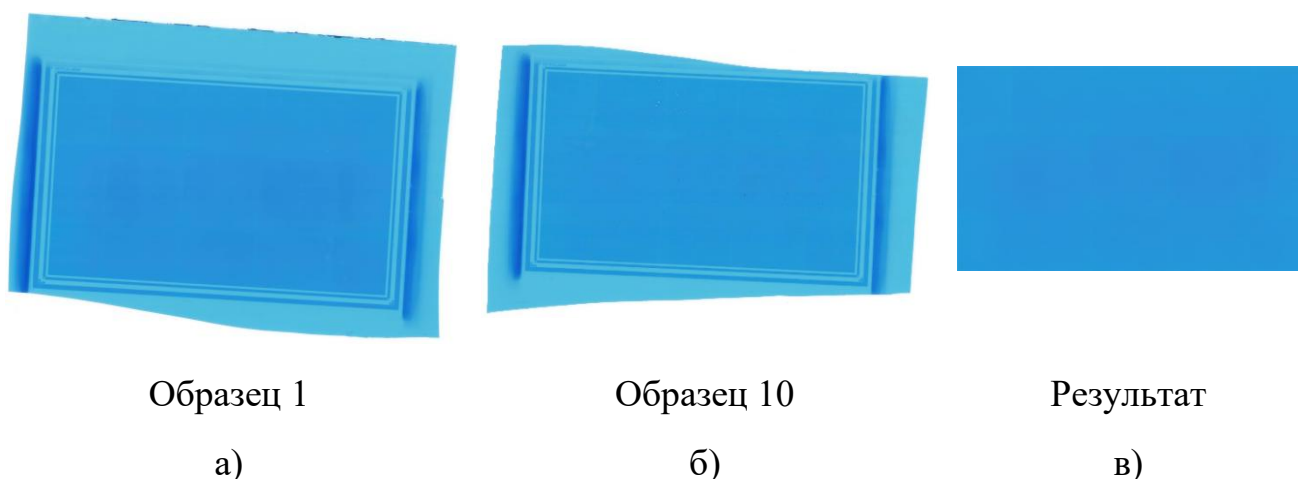


Рисунок 65 — Обработка изображений для определения изменения цвета фоторезиста в зависимости от времени экспонирования при прозрачности маски 87,5 %: а), б) образцы до обработки; в) результат обработки

По результатам компьютерной обработки исходного набора изображений определена зависимость между прозрачностью маски и цветом фоторезиста. Для упрощения выбран один цветовой канал, по которому будет определена интересующая зависимость. Для этого рассмотрено изменение средней яркости красного, зеленого и синего цветовых каналов, а также изменение яркости полутоновых изображений, полученных из исходных (Рисунок 66).

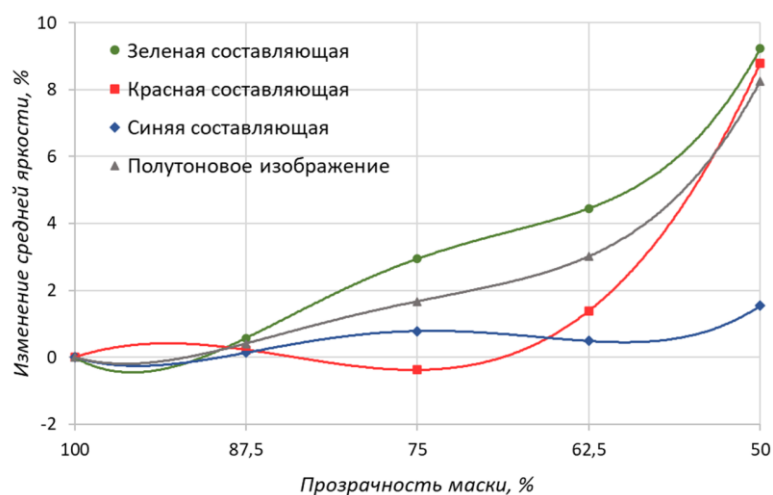


Рисунок 66 — Графики изменения средней яркости красной, синей, зеленой составляющих, а также значения яркости полутонового изображения в зависимости от прозрачности маски

Для дальнейшего рассмотрения выбрана зеленая составляющая изображения, так как ее изменение более равномерно относительно красной составляющей и изменение прозрачности маски характеризует большее изменение

яркости относительно других цветовых каналов и результатов, полученных по полутоновым изображениям.

Анализ изображений произведен по их гистограммам (Рисунок 67), по которым определены минимальное, максимальное и среднее значения яркости. Поскольку глубина цвета для исходных изображений составляет 8 бит, то значение яркости варьируется от 0 до 255. Для минимизации влияния шумов из выборки исключены 0,15 % измерений, которые имеют минимальные и максимальные значения.

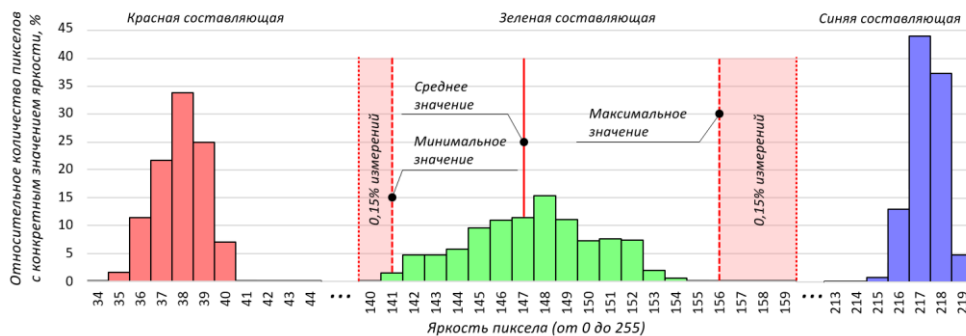


Рисунок 67 — Графики изменения средней яркости красной, синей, зеленой составляющих, а также значения яркости полутонового изображения в зависимости от прозрачности маски

По гистограммам зеленой составляющей фоторезиста построены зависимости изменения минимального, среднего и максимального значения яркости в зависимости от прозрачности маски (Рисунок 68а). с помощью метода наименьших квадратов произведена интерполяция полученных значений полиномом второй степени (Рисунок 68б). Для формирования функции необходимой прозрачности маски в зависимости от цвета фоторезиста, полученного при экспонировании без маски, необходимо:

- 1) Найти минимальное значение яркости для образца с полностью прозрачной маской (Рисунок 68а, точка 1). Так как использованием маски возможно только лишь сделать фоторезист светлее (увеличить яркость), но не темнее, то выравниванием цвета необходимо замаскировать все участки с яркостью больше минимальной до той степени, чтобы на всем изображении яркость стала одинаково минимальной.

2) Определить значение прозрачности маски, при котором среднее и минимальное значения яркости будут равны найденному на предыдущем шаге (Рисунок 68а, точки 2 и 3). Т.е. чтобы выровнять яркость для пикселей, у которых значение яркости без маски равно 141, 147 и 156 (минимальное, среднее и максимальное значения яркости) необходимо наложить маску со значениями 62 %, 70 % и 100 % соответственно (Рисунок 68б, точки 3, 2, 1).

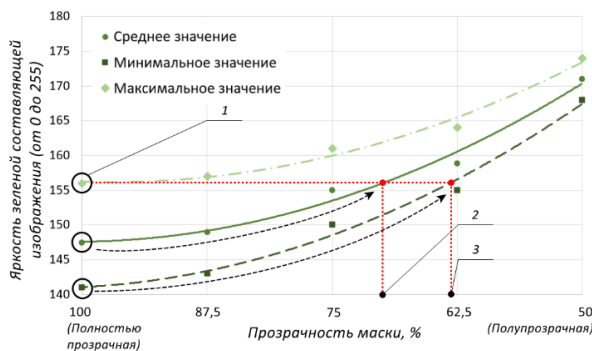
3) По полученным точкам интерполировать функцию необходимой прозрачности маски  $p(b)$  от яркости зеленой составляющей пиксела  $b$  полиномом второй степени с помощью МНК (Рисунок 68б) [108].

Таким образом, получена следующая функция компенсирующей маски (52):

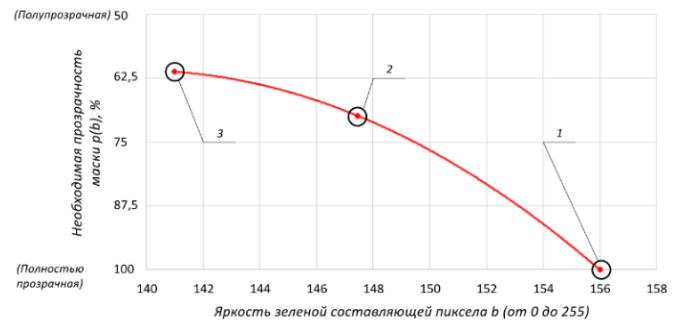
$$p(b) = 0,15324 \cdot b^2 - 42,97979 \cdot b + 3075,52941, \quad (52)$$

где:

- $p(b)$  — необходимая прозрачность маски, %;
- $b$  — значение зеленой составляющей цвета пиксела на изображении образца с полностью прозрачной маской.



а)



б)

Рисунок 68 — Формирование функции компенсирующей маски: а) функции изменения минимального, среднего и максимального значения яркости зеленой составляющей в зависимости от прозрачности маски; б) функция необходимой прозрачности маски в зависимости от яркости зеленой составляющей пиксела

Применив полученную функцию (52) к каждому пикселу изображения фотрезиста при полностью прозрачном шаблоне, определен вид компенсирующей маски (Рисунок 69а), а также проведено повторное экспонирование с применением



маски и без нее (Рисунок 69б, в). При визуальном рассмотрении изображений фоторезиста отчетливо заметно, что на изображении, полученном с использованием маски, отсутствует сетка от рассеивателя (Рисунок 70, у изображений увеличена яркость).

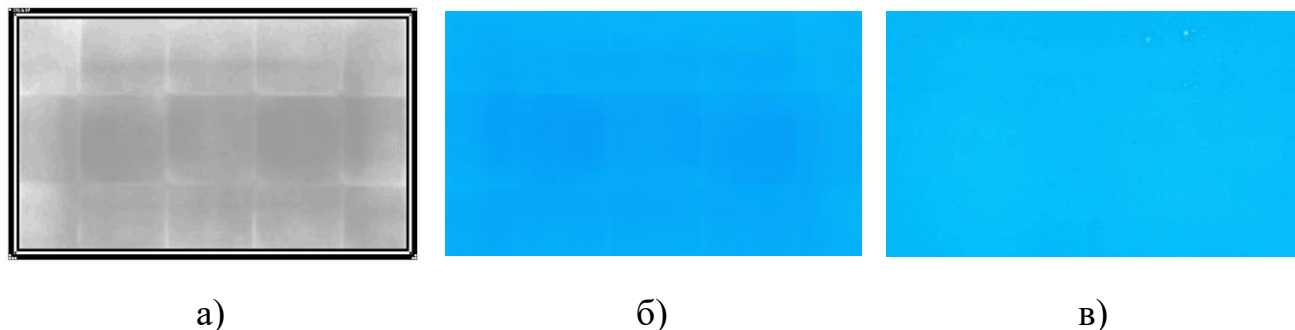


Рисунок 69 — Визуальная оценка неравномерности экспонирования фоторезиста (на изображениях фоторезиста увеличена контрастность): а) сгенерированная компенсирующая маска; б) образец экспонирования фоторезиста без маски; в) образец экспонирования фоторезиста с маской

Также произведена оценка изменения гистограммы зеленой составляющей изображений без маски и с ней (Рисунок 70).

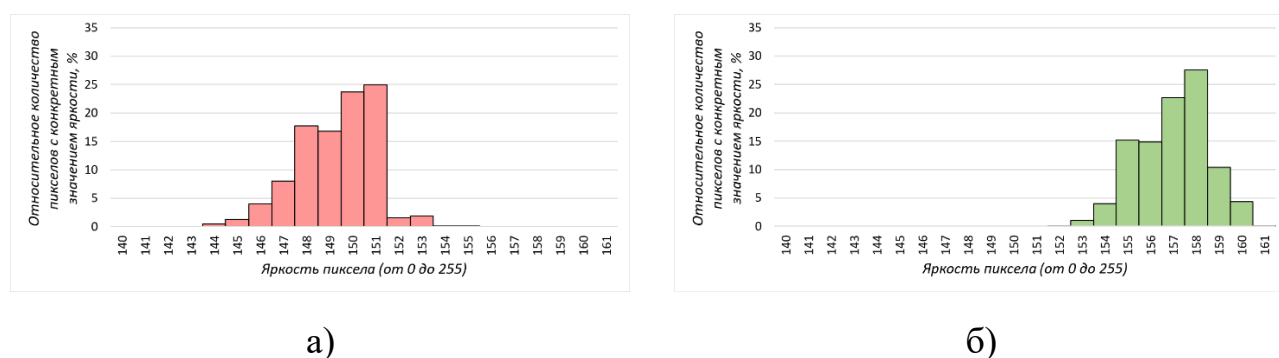


Рисунок 70 — Сравнение гистограмм распределения зеленой составляющей на изображениях фоторезиста: а) без маски; б) с маской

Выборочные среднее и СКО яркости зеленой составляющей изображений и СКО приведены в таблице 7. Применение компенсирующей маски привело к уменьшению СКО яркости зеленой составляющей в 2 раза по отношению к СКО, полученного без маски, что подтверждает эффективность предложенной методики. Таблица 7 — Статистические характеристики яркости зеленой составляющей изображений

|           | Выборочное среднее | Выборочное СКО |
|-----------|--------------------|----------------|
| Без маски | 147,46             | 2,97           |
| С маской  | 157,00             | 1,54           |

Операцию формирования компенсирующей маски необходимо отнести к этапу калибровки установки, т.е., проводя ее единожды, маска увеличит равномерность экспозиции для всех обрабатываемых в будущем заготовок. Повторная калибровка необходима при осуществлении каких-либо действий с системой экспонирования установки, например: при замене УФ-матрицы или рассеивателя; изменении их положения относительно друг друга, а также относительно ЖК-матрицы. Также рекомендуется производить повторную калибровку во время технического обслуживания установки для компенсации деградации УФ-светодиодов.

#### 4.3.4 Алгоритм генерации шаблона для отображения на жидкокристаллической матрице

Основным компонентом при технологической подготовке разработанного прототипа установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы к работе является процесс преобразования производственных файлов проекта ПП в изображения слоев, которые будут корректно отображаться на ЖК-матрице, т.е. генерация изображения шаблона (Рисунок 71).

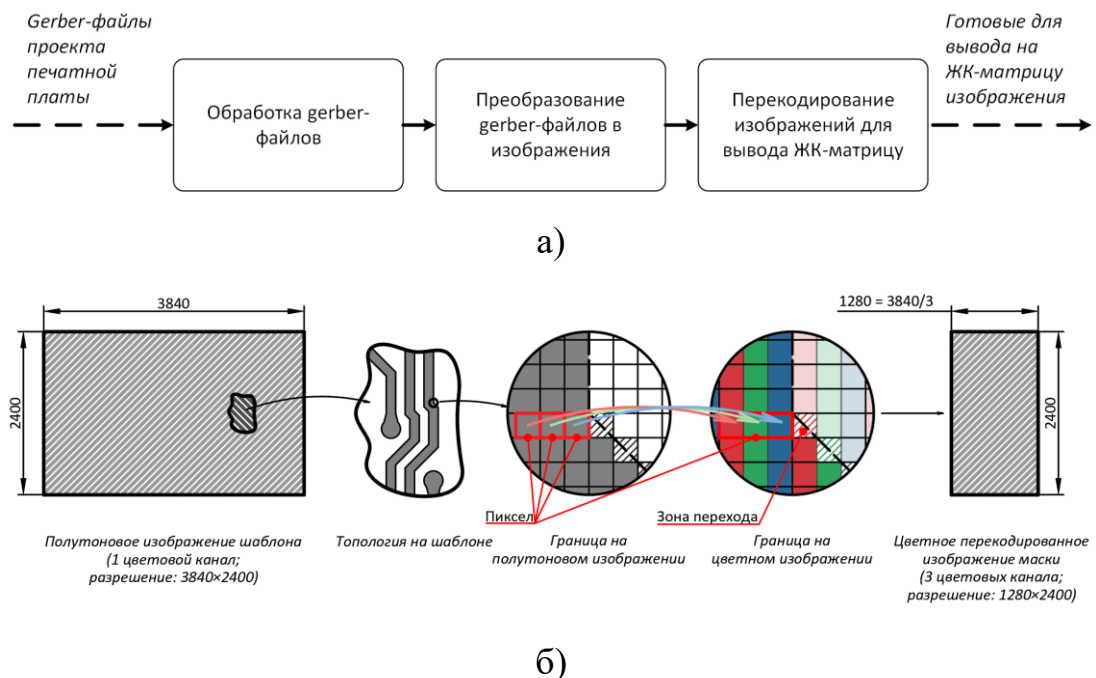


Рисунок 71 — Генерация изображений для отображения на ЖК-матрице:  
а) алгоритм генерации изображений из проекта ПП; б) сжатие изображения для отображения на ЖК-матрице

Создание необходимых для производства изображений осуществляется на основе gerber-файлов проекта ПП и состоит из этапов (Рисунок 71а):

- 1) Обработка gerber-файлов. Задачей этапа является подготовка файлов для их корректного преобразования в изображения, что главным образом обеспечивается соответствием разрешения ( $3840 \times 2400$ ) и разрешающей способности ЖК-матрицы. Разрешающая способность ЖК-матрицы определена через размер пиксела ( $34,6 \times 34,6$  мкм) и составляет около 734 точки на дюйм. Для обеспечения соответствия параметров изображений и ЖК-матрицы в gerber-файлы ПП добавлена окаймляющая проводящий рисунок рамка, размер которой соответствует размеру рабочей области установки ( $134,4 \times 84$  мм). По рамке будет осуществляться обрезка сгенерированного изображения.
- 2) Преобразование gerber-файлов в изображения. Реализация этого этапа преимущественно производится с помощью набора модулей для рендеринга gerber-файлов pcb-tools 0.1.6, разработанного на языке программирования Python. Набор модулей позволяет преобразовать gerber-файл в изображение формата png с заданным разрешением.
- 3) Перекодирование изображения для вывода на ЖК-матрицу (Рисунок 71б). ЖК-матрица определяется компьютером, формирующим изображение, как цветной монитор с разрешением  $1280 \times 2400$ , в котором каждый пиксел состоит из красного, зеленого и синего субпикселов. Поэтому отображение изображения с разрешением  $3840 \times 2400$  будет осуществляться некорректно. Так как матрица монохромная, то каждый субпиксел можно считать отдельным пикселем. Для корректного отображения: определен порядок следования субпикселов в пикселе (красный — зеленый — синий); сгенерированное изображение переведено в полутоновое, т. е. все субпикселы объединены в один пиксел; полутоновое изображение переведено обратно в цветное таким образом, чтобы один пиксел в качестве субпикселов содержал 3 пиксела полутонового изображения в определенном ранее порядке.

На рисунке (Рисунок 72) приведен пример подготовки изображения топологии с минимальной шириной проводников и зазоров 0,15 мм (сформированное из gerber-файла и перекодированное изображения), а также изображение рабочего поля установки с видеокамеры при отображении на ЖК-матрицу перекодированного изображения и результат фотолитографии.

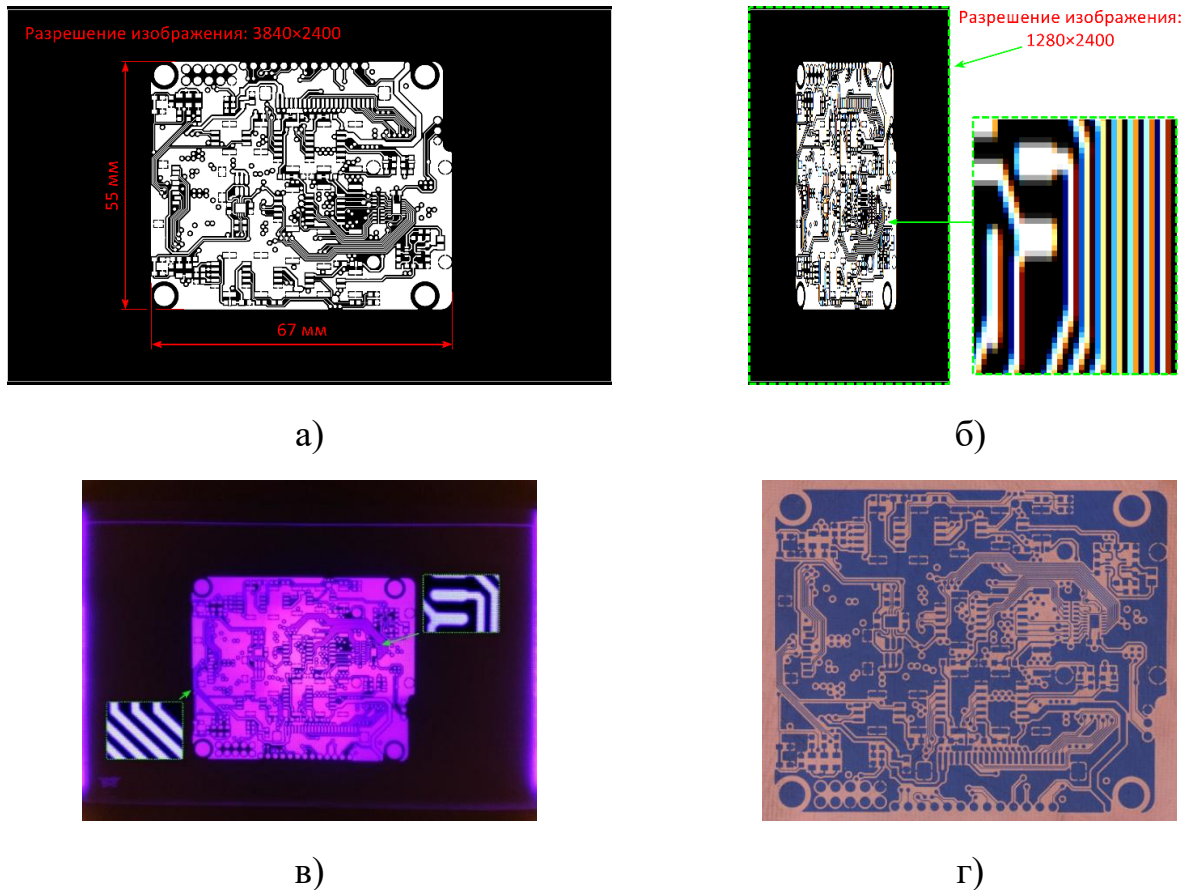


Рисунок 72 — Подготовка изображения топологии: а) изображение, сформированное из gerber-файла б) перекодированное изображение; в) изображение с видеокамеры в процессе экспонирования; г) результат после проявки

На перекодированном изображении выделен увеличенный участок, на котором отображено, что в одном цветном пикселе содержатся три отдельных пиксела (Рисунок 72б). На изображении, полученном с видеокамеры, указаны увеличенные участки, полученные с помощью микроскопа (Рисунок 72в), которые использованы для визуальной оценки качества сгенерированного шаблона. Точность операции экспонирования на установке зависит от физического размера пикселя на ЖК-матрице. При растеризации топологии возможны ошибки в зонах

перехода между прозрачными и затемненными участками (Рисунок 71б). Тогда точность воспроизведения проводящего рисунка может быть определена как размер стороны пикселя (34,6 мкм) для вертикальных и горизонтальных проводников, а для диагональных проводников — как диагональ пикселя (48,9 мкм).

Таким образом, с помощью разработанного прототипа подтверждена возможность использования ЖК-матрицы как цифрового шаблона на операции экспонирования, а также для обеспечения основной функциональности сформирована методика компенсации неравномерности излучения и описан алгоритм генерации шаблонов. Полученный результат позволяет перейти к разработке и исследованию способов совмещения шаблона и заготовки для установок экспонирования.

#### 4.4 Методика совмещения шаблона и заготовки

Для обеспечения корректного совмещения шаблона и заготовки необходимо рассмотреть две операции (Рисунок 73), на которых происходит определение функциональных зависимостей между разными системами координат (СК), с которыми работает установка, а именно: СК ЖК-матрицы или рабочего поля установки; СК видеокамеры или системы обратной связи и СК заготовки, расположенной на рабочем поле.

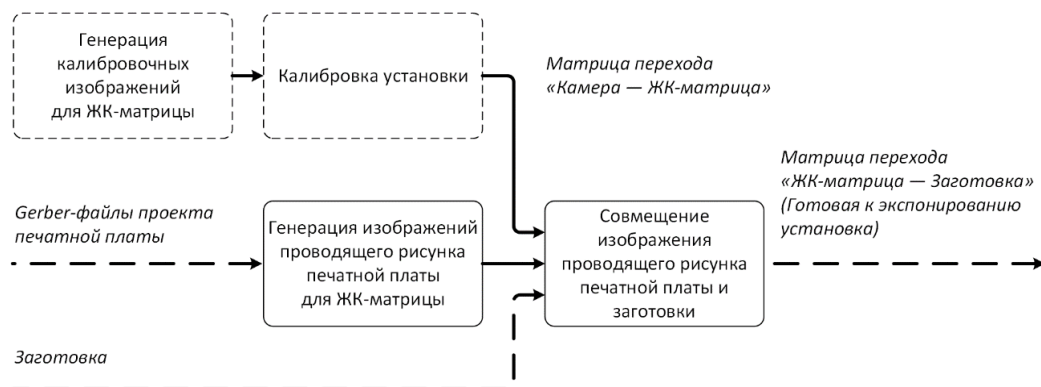


Рисунок 73 — Операции калибровки и позиционирования в процессе подготовки установки экспонирования к работе

Первая операция — подготовительная, на которой происходит калибровка

установки. Калибровка заключается в определении матрицы перехода «Камера — ЖК-матрица» между отображаемым на ЖК-матрице и получаемым с видеокамеры изображением. Выполнение операции калибровки не требуется при каждом запуске установки, а только в случае изменения положения камеры относительно рабочего поля установки.

Вторая операция — позиционирование шаблона на рабочем поле установки на основе информации с видеокамеры о положении заготовки, для которого определяется матрица перехода «ЖК-матрица — Заготовка», осуществляется генерация и отображение изображения проводящего рисунка.

Обе операции предполагают совмещение положения объектов на изображениях, полученных от разных источников. Так, установка экспонирования работает с тремя типами изображений, каждое из которых имеет собственную СК. К изображениям первого типа относятся изображения топологии, сгенерированные в оригинальном разрешении ЖК-матрицы  $3840 \times 2400$  (далее — оригинал, Рисунок 72а). По этим изображениям можно получить информацию о расположении элементов проводящего рисунка. Ко второму типу относятся перекодированные изображения-оригиналы с разрешением  $1280 \times 2400$ , которые необходимы для корректного отображения топологии на ЖК-матрице (далее — шаблон, Рисунок 72б). К третьему типу относятся полученные с камеры изображения рабочего поля установки (далее — фото, Рисунок 72в) с разрешением  $3264 \times 2488$ .

#### **4.4.1 Алгоритм совмещения на основе общей матрицы перехода**

Для калибровки установки необходимо рассмотреть оригинал и фото. Оба изображения имеют свои собственные СК, и операция калибровки необходима для определения связи между ними. В качестве базовой СК используется СК оригинала, так как на ее основе производится генерация шаблона для отображения на ЖК-матрице. Т. е. основной задачей калибровки является определение функционала для перехода из СК видеокамеры в систему оригинала. В условиях обеспечения незначительного влияния проекционных искажений [110] и дисторсии [111] на изображение с камеры такой переход осуществим с помощью

аффинных преобразований [112]. Тогда, совокупное преобразование может быть описано комбинацией трех его составляющих: поворота, растяжения и сдвига (Рисунок 74).

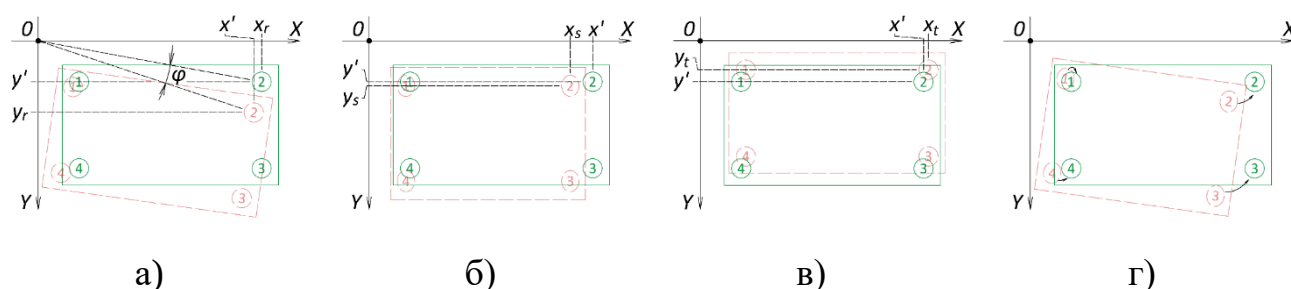


Рисунок 74 — Виды аффинных преобразований для совмещения фото (пунктирная линия) и оригинала (сплошная линия): а) поворот; б) растяжение; в) сдвиг; г) составное преобразование (реальный случай)

Аффинные преобразования для поворота, растяжения и сдвига описываются уравнениями (53)–(55) соответственно:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \end{pmatrix}, \quad (53)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \end{pmatrix}, \quad (54)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}, \quad (55)$$

где:

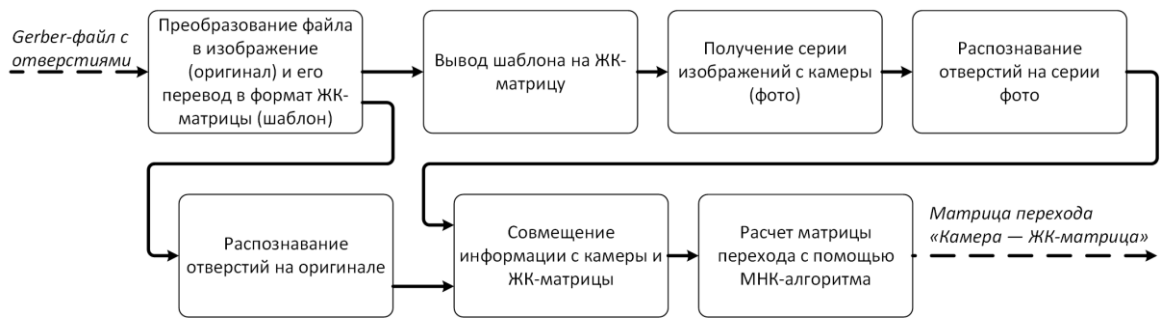
- $x', y'$  — координаты точки после преобразования;
- $\varphi$  — угол поворота изображения;
- $x_r, y_r$  — координаты точки на изображении до поворота;
- $s_x, s_y$  — коэффициенты растяжения изображения по осям;
- $x_s, y_s$  — координаты точки на изображении до растяжения;
- $t_x, t_y$  — значения сдвига изображения по осям;
- $x_t, y_t$  — координаты точки на изображении до сдвига.

Тогда в общем виде комбинация этих преобразований может быть описана формулой (56):

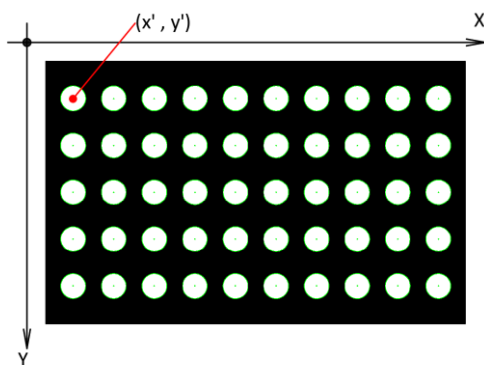
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}, \quad (56)$$

где:  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{22}$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  — коэффициенты аффинного преобразования.

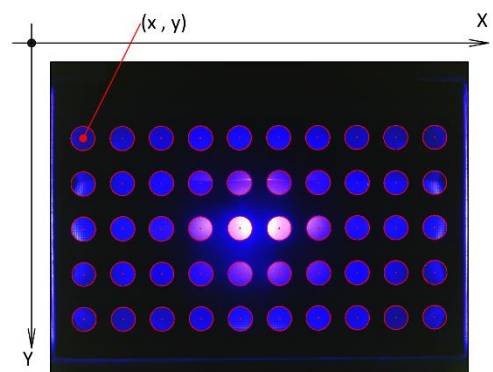
Таким образом, задача калибровки сведена к определению коэффициентов  $a$  и  $b$ , что может быть осуществлено согласно разработанному алгоритму (Рисунок 75а).



а)



б)



в)

Рисунок 75 — Реализация калибровки: а) алгоритм; б) распознавание реперных кругов на оригинале; в) распознавание реперных кругов на фото

На ЖК-матрицу выводится шаблон, содержащий матрицу кругов, и камера производит серию снимков. Затем, с помощью преобразования Хафа [113] (реализован в программном модуле библиотеки компьютерного зрения OpenCV) происходит распознавание кругов на оригинале и фото (Рисунок 75б, в).

Далее произведено совмещение полученной информации с видеокамеры и ЖК-матрицы — отсечены ложные распознавания, обеспечена идентичность результатов распознавания (на изображениях с двух источников присутствуют одни и те же круги), а также произведена их сортировка, которая обеспечивает сопоставление координат центров идентичных кругов. Тогда оценку



коэффициентов матрицы перехода можно определить с помощью алгоритма МНК (57) [108]:

$$\hat{\theta}_{\text{МНК}} = (C^T C)^{-1} C^T \tilde{z}, \quad (57)$$

где:

—  $\hat{\theta}_{\text{МНК}}^T = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \end{pmatrix}$  — матрица аффинного преобразования «видеокамера — ЖК-матрица»;

—  $C^T = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,N} & x_{M,1} & x_{M,N} \\ y_{1,1} & \dots & y_{1,N} & \dots & y_{M,1} & \dots & y_{M,N} \\ 1 & & 1 & & 1 & & 1 \end{pmatrix}$  — матрица измерений, в которой хранится информация о координатах центров распознанных кругов  $(x_{i,j}, y_{i,j})$  на фотографиях с видеокамеры ( $i$  — номер изображения с камеры от единицы до  $M$ ,  $j$  — номер круга на изображении от единицы до  $N$ ), т. е. матрица  $C^T$  содержит  $M \times N$  столбцов;

—  $\tilde{z}^T = \begin{pmatrix} x'_1 & \dots & x'_N & \dots & x'_1 & \dots & x'_N \\ y'_1 & & y'_N & & y'_1 & & y'_N \end{pmatrix}$  — матрица с распознанными координатами центров кругов на оригинале  $(x'_j, y'_j)$ , которые соответствуют координатам  $(x_{i,j}, y_{i,j})$ . Поскольку к одному центру на оригинале относится несколько центров (с нескольких фотографий рабочего поля), то матрица также имеет  $M \times N$  столбцов.

Однако, для применения МНК-алгоритма необходимо обеспечить совмещение информации о центрах кругов, полученных с шаблона и фотографий, что эквивалентно выполнению двух условий: на изображениях присутствуют одни и те же круги, а также известна информация о взаимосвязи центров между изображениями. Первое условие осуществимо с помощью настройки параметров для преобразования Хафа, которые могут быть определены эмпирически при наложении требований к неизменности освещения и положения видеокамеры относительно ЖК-матрицы. Выполнение второго условия обеспечивается эквивалентностью порядка следования распознанных кругов на изображениях, т. е. сортировкой (Рисунок 75). Ввиду идентичности начальных условий и требований этот алгоритм также может быть использован во время операции совмещения

систем координат изображения шаблона и изображения заготовки с видеокамеры по просверленным отверстиям или другим реперным знакам.

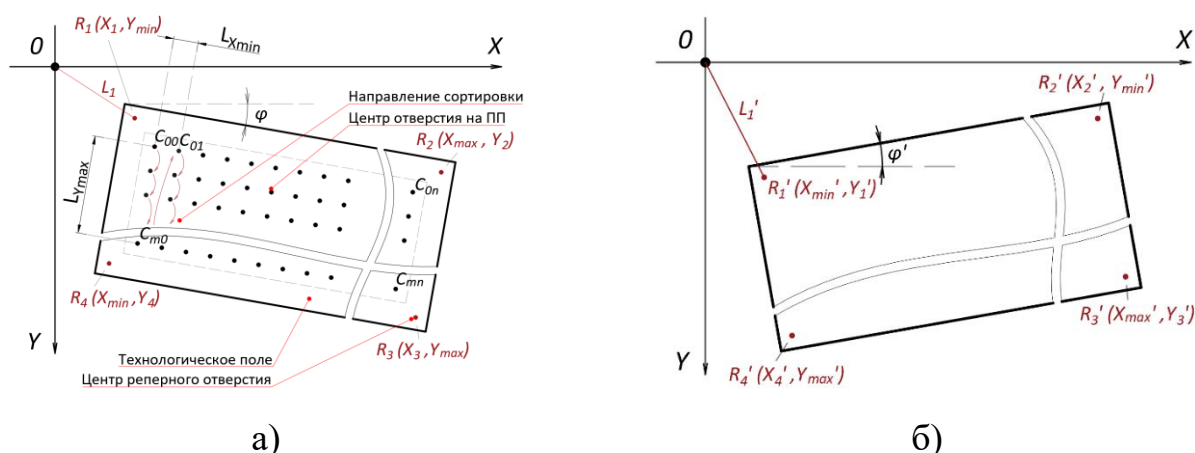


Рисунок 76 — Сортировка координат центров реперных знаков кругов (отверстий или реперных знаков), изображение повернуто относительно видеокамеры на угол а) по часовой стрелке б) против часовой стрелки

Сортировка должна быть нечувствительна к наличию незначительного угла поворота у изображения, что обусловлено погрешностью при установке видеокамеры, а также к возможному смещению центра круга из-за неточности распознавания по причине наличия у камеры цифрового шума. В качестве критерия сортировки  $\beta$  (58) предлагается использовать сумму координат центра круга с применением весового коэффициента  $\alpha$  к одной из координат ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ):

$$\beta_j = x_j + \alpha y_j. \quad (58)$$

Для использования критерия  $\beta$  необходимо определить диапазон возможных значений весового коэффициента  $\alpha$ , который обеспечит корректность сортировки. С одной стороны, значение коэффициента ограничено сверху функциональной связью, зависящей от минимального расстояния между центрами в одном ряду  $L_{Xmin}$  и максимальным расстоянием между центрами в одном столбце  $L_{Ymax}$ , а также от угла поворота заготовки  $\varphi$ . с другой стороны, величина  $\alpha$  ограничена снизу шумами видеокамеры и производственными погрешностями, которые смещают центры кругов на изображении заготовки.

Тогда желаемый порядок сортировки центров  $C_{00}, C_{10}, \dots, C_{m0}, C_{01}, C_{11}, \dots, C_{mn}$  ( $m$  — количество рядов центров на изображении,  $n$  — количество столбцов) можно представить в виде неравенства:  $\beta_{00} < \beta_{10} < \dots < \beta_{m0} < \beta_{01} < \beta_{11} \dots < \beta_{mn}$ .

Поскольку отверстия или реперные знаки на заготовке могут находиться не в виде прямоугольной матрицы, то для поиска коэффициента  $\alpha$  можно рассмотреть только центры, имеющие минимальное расстояние в одном ряду  $L_{Xmin}$  и максимальное расстояние в одном столбце  $L_{Ymax}$ . Если предположить, что таковыми являются центры реперных знаков  $C_{m0} (x_0, y_0)$ ,  $C_{m0} (x_0 - L_{Ymax} \sin(\varphi), y_0 + L_{Ymax} \cos(\varphi))$ ,  $C_{01} (x_0 + L_{Xmin} \cos(\varphi), y_0 + L_{Xmin} \sin(\varphi))$ . Тогда наиболее жестким условием является  $\beta_{m0} < \beta_{01}$ . Подставив координаты центров  $C_{m0}$  и  $C_{01}$  в выражение (58), в явном виде выражено значение коэффициента  $\alpha$  (59).

$$\alpha < \frac{L_{Xmin} + L_{Ymax} \operatorname{tg}(\varphi)}{L_{Ymax} - L_{Xmin} \operatorname{tg}(\varphi)}. \quad (59)$$

Выражение (59) позволяет определить максимальное значение весового коэффициента  $\alpha$  в зависимости от расположения отверстий и угла поворота заготовки. При варьировании значения угла поворота заготовки определено, что корректная сортировка с помощью предложенного критерия (59) невозможна, если изображение повернуто против часовой стрелки, так как величина  $\alpha$  принимает отрицательные значения. Эта проблема может быть решена предварительным доворотом изображения, что требует определения направления и угла доворота. Оба параметра могут быть получены путем анализа положения кругов на краях изображения — в качестве таких кругов могут также выступать отверстия или реперные отверстия на технологическом поле заготовки. При этом необходимо обеспечить условие, чтобы два круга (например,  $R_1$  и  $R_2$ , Рисунок 76а) лежали на прямой, параллельной оси абсцисс.

Сначала необходимо определить расположение реперных отверстий на изображении: если заготовка повернута по часовой стрелке (Рисунок 76а), то они будут иметь координаты  $R_1 (x_1, y_{min})$ ,  $R_2 (x_{max}, y_2)$ ,  $R_3 (x_3, y_{max})$ ,  $R_4 (x_{min}, y_4)$ ; для угла против часовой стрелки (Рисунок 76б) —  $R'_1 (x'_{min}, y'_1)$ ,  $R'_2 (x'_2, y'_{min})$ ,  $R'_3 (x'_{max}, y'_3)$ ,  $R'_4 (x'_4, y'_{max})$ , таким образом, их идентификация среди всех отверстий возможна путем выделения сортировкой всех отверстий по  $x$  и  $y$ . Затем, из реперных отверстий определяется такое, у которого расстояние до начала

координат будет минимально. Если угол необходимого доворота по модулю не превышает  $90^\circ$ , то центр  $R_1 (x_1, y_{min})$  имеет минимальное расстояние при наличии угла по часовой стрелке, в противном случае —  $R'_1 (x'_{min}, y'_1)$ . На последнем этапе необходимо вычислить значение угла доворота, что возможно сделать из уравнения прямой, проходящей через точки  $R_1$  и  $R_2$ ,  $R'_1$  и  $R'_2$  для двух случаев  $\varphi$  и  $\varphi'$  соответственно (60):

$$\varphi = \arctg\left(\frac{y_2 - y_{min}}{x_{max} - x_1}\right), \varphi' = \arctg\left(\frac{y'_{min} - y'_1}{x'_{2} - x'_{min}}\right). \quad (60)$$

Поворот изображения на полученный угол позволит использовать предложенный алгоритм сортировки вне зависимости от исходного знака угла между изображениями, а выражение (59) для поиска весового коэффициента  $\alpha$  преобразуется к виду (61):

$$\lim_{\varphi \rightarrow 0} \alpha = \alpha_{max} = L_{xmin}/L_{ymax}. \quad (61)$$

На изображениях (Рисунок 77а–д) представлен алгоритм сортировки по шагам, а также результат некорректного распознавания при слишком маленьком коэффициенте  $\alpha$  (Рисунок 77е).

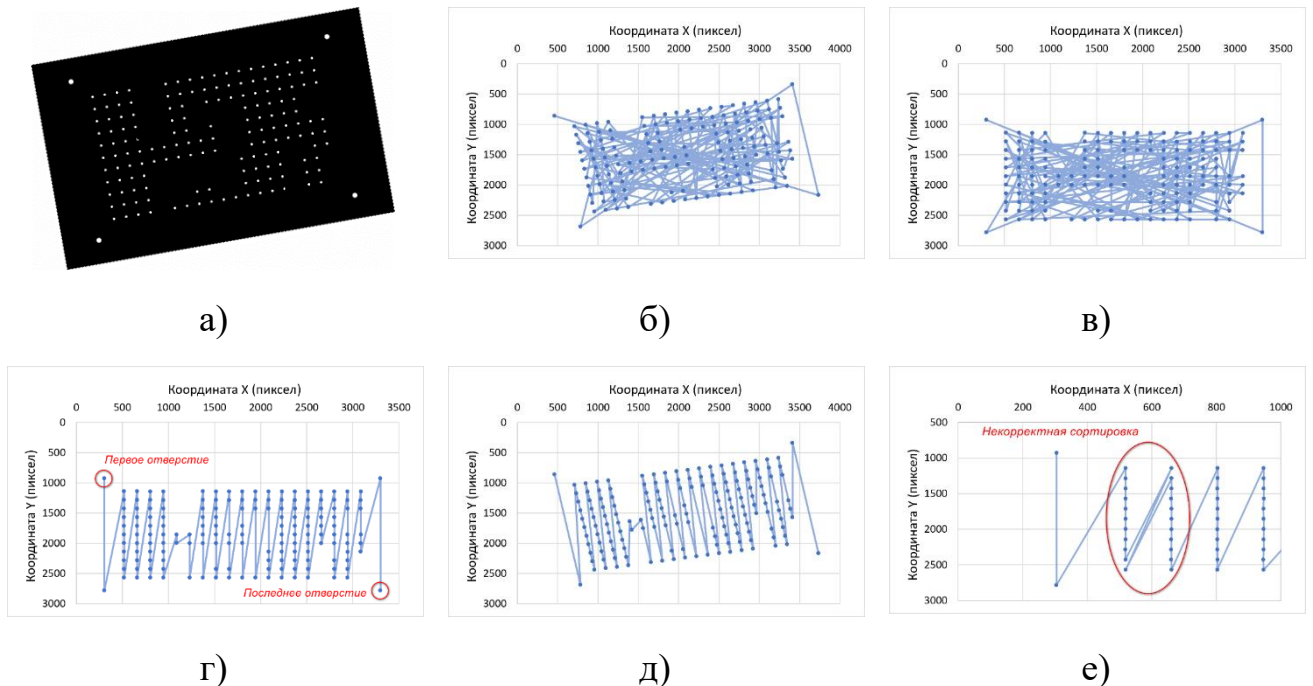


Рисунок 77 — Сортировка: а) исходное изображение; б) после распознавания; в) после поворота; г) после сортировки ( $\alpha \approx 0,06$ ); д) наложение результата на исходные координаты; е) результат некорректной сортировки ( $\alpha \approx 0,01$ )

Поскольку снизу величина  $\alpha$  ограничена величиной погрешности смещения центра отверстия, то рекомендуется выбирать значение  $\alpha \sim [0,5\alpha_{max}, 0,9\alpha_{max}]$ .

Таким образом, предложенный алгоритм обеспечивает совмещение изображений, полученных от разных источников, с помощью общей матрицы перехода  $\hat{\theta}_{\text{МНК}}$ . В качестве его достоинств можно выделить нечувствительность к единичным ошибкам определения центров кругов (реперных знаков или отверстий), сохранение формы элементов проводящего рисунка, обусловленное заданным видом матрицы перехода. Недостатком алгоритма является отсутствие возможности внесения локальных искажений, что может понадобиться, например, при наличии смещения одного из реперных знаков или при попытке внесения заведомой величины искажений для компенсации деформации слоя ПП, которая может возникнуть в процессе ее последующего изготовления.

#### 4.4.2 Алгоритм совмещения на основе конечно-элементной сетки

Реализация локальных искажений изображения топологии возможна с помощью алгоритма совмещения на основе конечно-элементной (КЭ) сетки (Рисунок 78), расширяющего алгоритм совмещения на основе общей матрицы перехода.

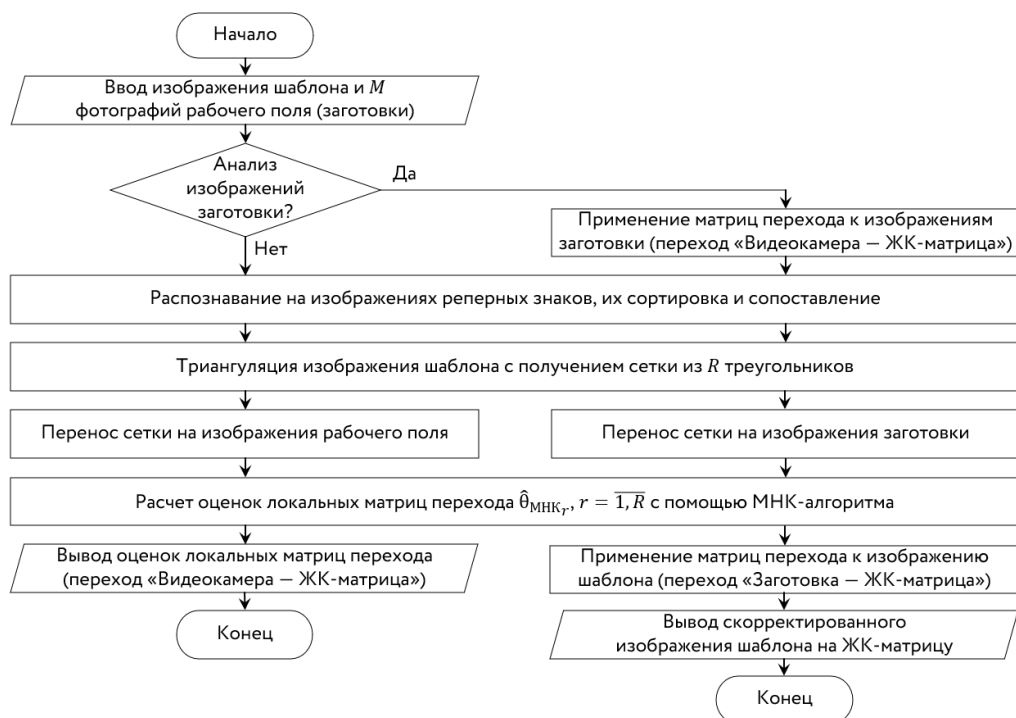


Рисунок 78 — Блок-схема алгоритма совмещения на основе КЭ-сетки

Алгоритм также предполагает работу с изображением шаблона и серии изображений рабочего поля установки экспонирования или заготовки с реперными знаками. На первом этапе, аналогично рассмотренному ранее алгоритму, производится: распознавание методами компьютерного зрения реперных знаков, определение их координат; сортировка и сопоставление. В случае, если на входе представлены фотографии заготовки необходимо предварительно перевести их в систему координат рабочего поля установки (осуществить переход «Видеокамера — ЖК-матрица»).

Затем осуществляется построение КЭ-сетки на шаблоне. Для разбиения исходного изображения используется триангуляция Делоне [114] на основании координат реперных знаков (Рисунок 79), выступающих в качестве узлов сетки (разбиение осуществляется при помощи метода «Delaunay» из набора модулей «SciPy» языка программирования Python).

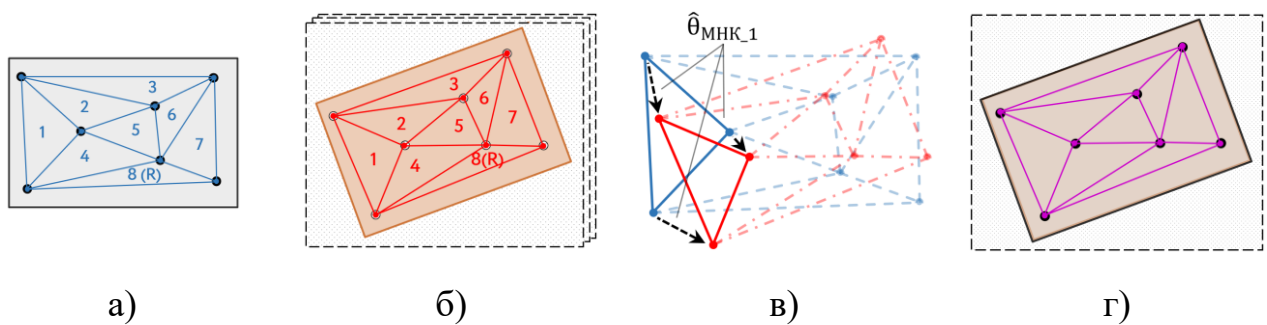


Рисунок 79 — Этапы совмещения на основе КЭ сетки: а), б) триангуляция; в) совмещение с помощью локальных матриц перехода; г) результат

Поскольку на первом этапе осуществлено сопоставление реперных знаков на шаблоне и рабочем поле, то триангуляция изображений с видеокамеры осуществляется путем переноса результата, полученного для шаблона. Результатом этапа является набор из  $R$  треугольников на исходной выборке изображений.

По полученным группам треугольников необходимо с помощью алгоритма МНК для каждой группы  $r = \overline{1, R}$  найти локальную матрицу перехода  $\hat{\theta}_{\text{МНК}}$  по формуле (57). В зависимости от группы изображений на входе на последнем этапе осуществляется:

- вывод локальных матриц перехода для случая анализа изображений рабочего поля с выведенным калибровочным шаблоном (сформированные матрицы обеспечивают переход «Видеокамера — ЖК-матрица»);
- применение локальных матриц перехода к шаблону топологии и вывод его на ЖК-матрицу (сформированные матрицы обеспечивают переход «Видеокамера — ЖК-матрица»).

Точность совмещения с использованием данного алгоритма определяется точностью определения координат центров реперных знаков системой обратной связи. Применение данного алгоритма накладывает дополнительные требования к точности распознавания координат центров реперных знаков, поскольку любое ошибочное изменение их значения приведет к некорректному формированию локальной матрицы перехода, что ухудшит точность совмещения.

#### 4.4.3 Методика совмещения шаблона и заготовки для системы прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы

На основе сформированных алгоритмов разработана методика совмещения шаблона и заготовки для системы прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы (Рисунок 80).

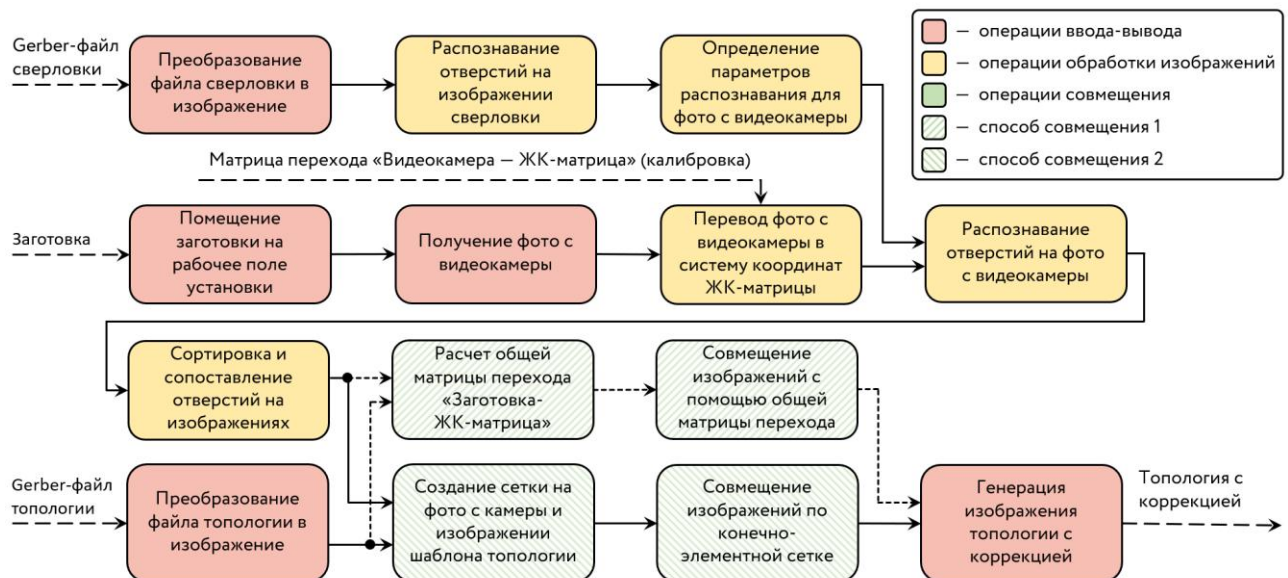


Рисунок 80 — Методика совмещения шаблона и заготовки для системы прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы

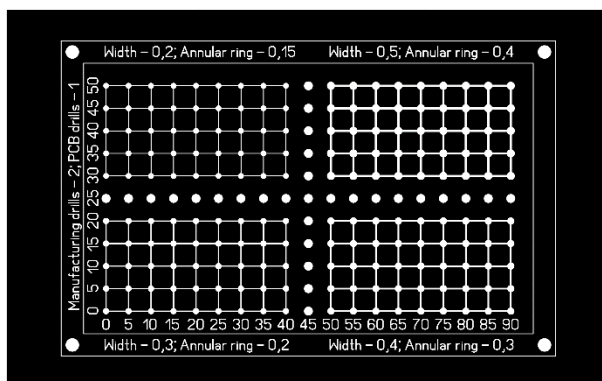
Методика совмещения содержит следующие этапы (Рисунок 81):

- 1) Преобразование gerber-файла сверловки в изображение с оригинальным разрешением (3840×2400). Это изображение является цифровым двойником заготовки, помещенной на рабочее поле установки.
- 2) Распознавание отверстий на оригинале сверловки и определение их координат.
- 3) Определение параметров распознавания реперных знаков для фотографий с видеокамеры. Поскольку при распознавании кругов на оригинале сверловки отсутствуют погрешности, обусловленные цифровым шумом видеокамеры и влиянием других технологических операций, то корректное распознавание отверстий доступно в довольно широком диапазоне варьирования параметров поиска: минимального и максимального диаметра кругов и минимального расстояния между ними. Так как результат распознавания реперных знаков на фотографии сильно зависит от этих параметров, то по результатам распознавания по оригиналу сверловки определяются требуемые параметры для фотографий с учетом погрешности определения центров 10 %.
- 4) Помещение заготовки с нанесенным фоторезистом на рабочее поле стороной, предназначенной для экспонирования, вниз с последующей фиксацией для обеспечения плотного контакта между фоторезистом и ЖК-матрицей.
- 5) Получение с видеокамеры изображения заготовки (Рисунок 81б).
- 6) Перевод фотографии в систему координат ЖК-матрицы с помощью матрицы перехода «Видеокамера — ЖК-матрица», определенной на этапе калибровки.
- 7) Распознавание отверстий на изображении с видеокамеры.
- 8) Сортировка и сопоставление отверстий по описанному ранее алгоритму.
- 9) Перевод gerber-файла топологии проводящего слоя в изображение-оригинал.
- 10) Определение компенсирующей матрицы перехода между оригиналом сверловки и фотографией заготовки, переведенной в систему координат

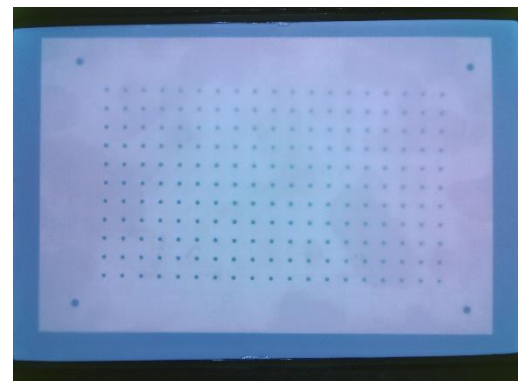


ЖК-матрицы по распознанным отверстиям. На этапе возможен выбор варианта алгоритма совмещения: на основе общей матрицы перехода или конечно-элементной сетки. Также на этапе происходит масштабирование изображения, необходимость которого обусловлена толщиной заготовки, изменяющей расстояние от плоскости съемки до камеры. Масштабный коэффициент (Рисунок 81в) может быть получен путем пробного экспонирования без масштабирования с последующим определением отношения какого-либо линейного размера на заготовке после экспонирования к проектируемому значению (для заготовки толщиной 1,5 мм значение масштабного коэффициента, определенного предложенным способом, составляет 0,977).

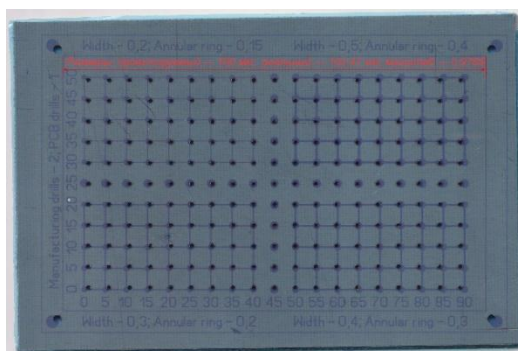
- 11) Перевод компенсированного оригинала топологии слоя в изображение-шаблон и вывод его на ЖК-матрицу.



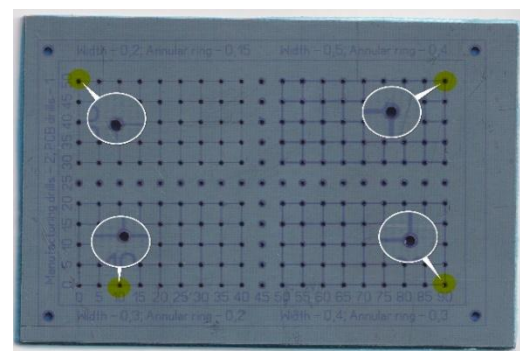
а)



б)



в)



г)

Рисунок 81 — Совмещение заготовки и шаблона на установке с помощью общей матрицы перехода: а) используемый негативный шаблон топологии; б) фотография рабочего поля установки с заготовкой; в) результат экспонирования без масштабного коэффициента; г) результат экспонирования

Для проверки работоспособности методики совмещения разработан тестовый образец топологии ПП (Рисунок 81а) с отверстиями диаметром 1 мм, расположенными в виде прямоугольной матрицы; ширина дорожек варьируется от 0,2 до 0,5 мм с шагом 0,1 мм; поясок контактной площадки имеет значения: 0,15, 0,2, 0,3 и 0,4 мм, соответственно. Совмещение осуществлено с помощью применения общей матрицы перехода. Результат экспонирования представлен на рисунке 81г. Обеспечено попадание всеми отверстиями в контактные площадки, что подтверждает работоспособность методики. Полученный результат подтверждает возможность успешного совмещения заготовки третьего класса точности по ГОСТ Р 53429-2009 [72] без критических смещений проводящего рисунка.

Также проведена апробация алгоритма сеточного совмещения с использованием изображения спроектированной топологии (Рисунок 81а) и фотографии заготовки на рабочем поле (Рисунок 81б):

- 1) проведена триангуляция изображения шаблона (Рисунок 82а) и осуществлен ее перенос на фотографию заготовки;
- 2) рассчитаны локальные матрицы перехода, в соответствии с которыми определена карта требуемых искажений шаблона (Рисунок 82б, желтыми линиями изображены вектора смещений узлов сетки);
- 3) произведено совмещение изображений шаблона и заготовки (Рисунок 82в).

При визуальной оценке полученного результата подтверждено совпадение предполагаемых центров контактных площадок и отверстий за счет внесения искажений в геометрию шаблона. Увеличенный размер смещений обусловлен изменением расстояния от плоскости съемки до видеокамеры при фотографировании, аналогично предыдущему результату (к полученному изображению не применен масштабный коэффициент). Также на изображении (Рисунок 82в) наблюдается обрезка топологии на технологическом поле заготовки, обусловленная выходом элементов проводящего рисунка за область построенной сетки, которая может быть исправлена добавлением углов заготовки в качестве

реперных точек или увеличением размера технологического поля.

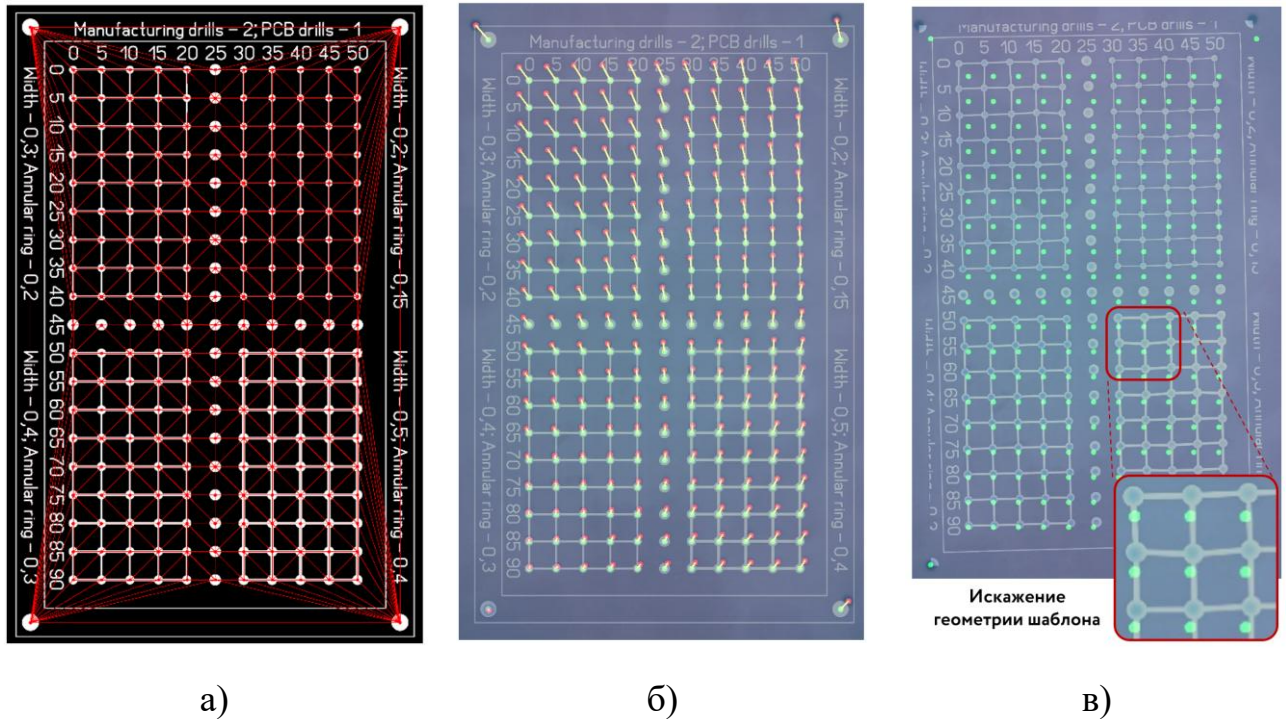


Рисунок 82 — Тестирование алгоритма совмещения на основе конечно-элементной сетки: а) сетка на изображении шаблона; б) определение величины смещения узлов сетки (красные точки — координаты узлов на заготовке, зеленые — на шаблоне); в) результат совмещения изображений (зеленые точки — исходные координаты узлов на шаблоне)

Полученные результаты подтверждают возможность применения разработанных методик для компенсации несовпадения координат заготовки и шаблона. Однако, внесение искажений в шаблон на этапе производства перед применением требует повторной проверки соответствия геометрических размеров измененной топологии технологическим возможностям производства, поскольку в настоящее время методика не учитывает данные ограничения, что влечет за собой возможную потерю этого свойства.

Экспериментальное тестирование алгоритмов демонстрирует возможность совмещения для ПП с уже просверленными технологическими, монтажными и переходными отверстиями (Рисунок 83), что определяет возможность использования установки в процессах изготовления ДПП тентинг-методом или МПП методом попарного прессования [78].

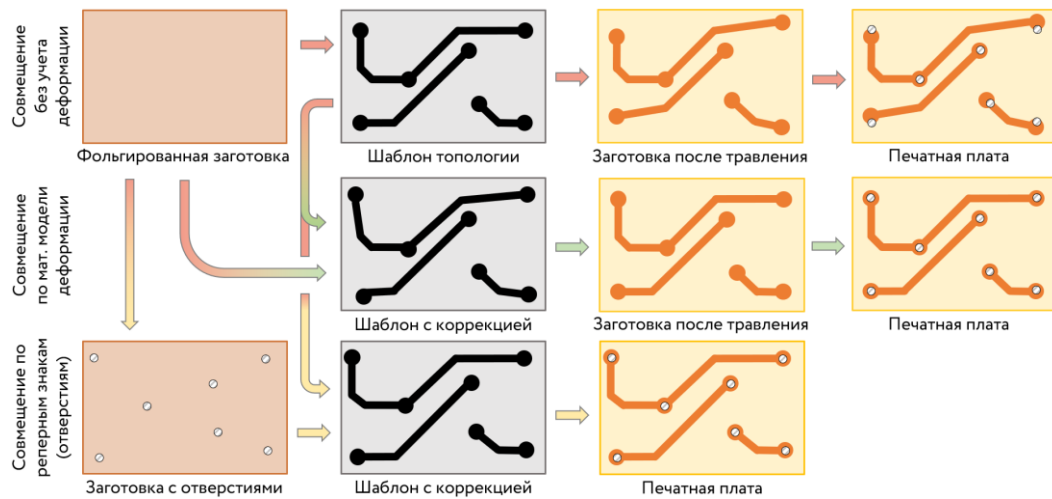


Рисунок 83 — Возможные варианты процесса совмещения шаблона и заготовки на этапе фотолитографии

Также в случае необходимости, разработанная методика предоставляет возможности:

- проведения операции совмещения только по технологическим отверстиям или реперным знакам, что актуально при изготовлении внутренних слоев многослойных печатных плат по методу металлизации сквозных отверстий;
- предиктивного внесения искажений по виртуальным реперным точкам на основе математических моделей деформации базового материала, уменьшения величины рассовмещения между слоями МПП (Рисунок 83), что использовано в разработанном программном обеспечении для анализа и расчета величины деформации заготовок слоев многослойных печатных плат [27–29] (Приложение Б, Рисунки Б.1–Б.3).

#### 4.5 Вероятность выхода годной заготовки для процесса совмещения

На основе выборки из 100 фотографий сформирована матрица перехода от фотографии рабочего поля установки (Рисунок 75в) к ЖК-матрице (Рисунок 75б) и произведена визуальная и статистическая оценка результатов наложения. Для оценки использован шаблон с 50 реперными знаками в форме кругов.

На рисунке 84а представлен результат наложения выборки на оригинал (величина отклонения увеличена в 15 раз). На рисунке 84а можно наблюдать наличие проекционных искажений, выраженных в виде смещения среднего

значения координаты центра реперного знака на фотографии с видеокамеры относительно эталонного положения. Искажения обусловлены неперпендикулярностью оси камеры плоскости съемки, а также дисторсией, а также неравномерностью УФ-свечения на камере, что видно на рисунке 75в. На основе полученной карты смещений вычислены основные статистические характеристики смещения относительно эталонной координаты для каждой реперной точки, а именно: выборочные средние по осям  $X$  и  $Y$  ( $m_{x_k}, m_{y_k}$ ), выборочные СКО по осям  $X$  и  $Y$  ( $\sigma_{x_k}, \sigma_{y_k}$ ), а также выборочный коэффициент корреляции  $\rho_i$  (фрагмент результатов представлен в таблице 8, все значения отражены в Приложении Д).

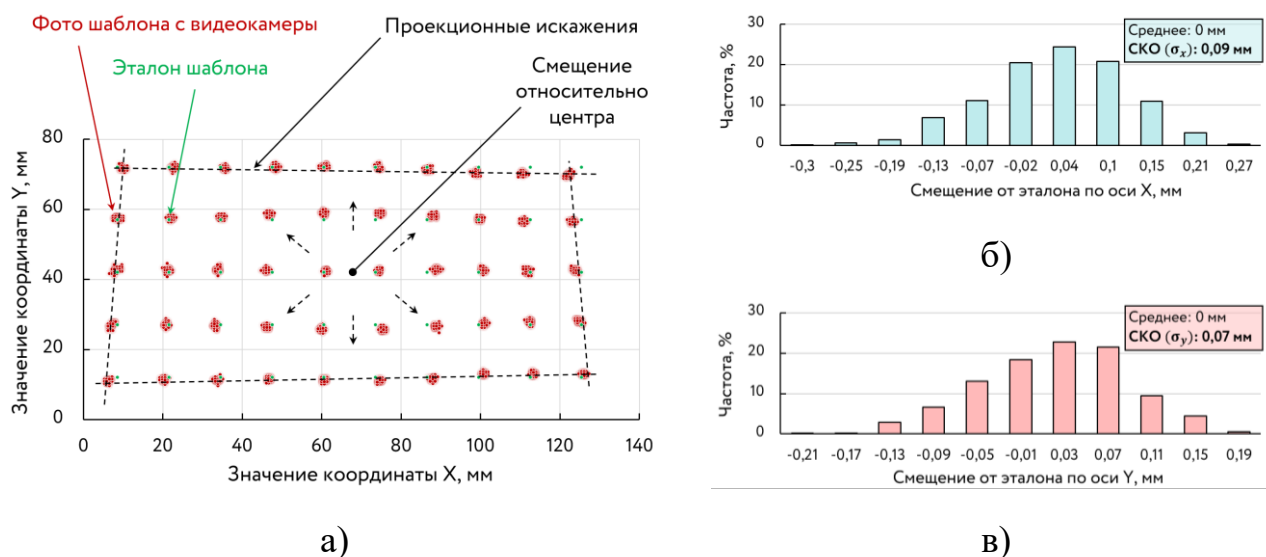


Рисунок 84 — Оценка результатов наложения при применении общей матрицы перехода: а) графическое наложение выборки фотографий и оригинала (величина отклонения увеличена в 15 раз); б), в) гистограммы смещения центра реперного отверстия относительно оригинала по осям  $X$  и  $Y$

Таблица 8 — Фрагмент таблицы с статистическими характеристиками смещения при совмещении на основе общей матрицы перехода

| Номер реперной точки, $k$ | Выборочное среднее смещения по оси $X$ , $m_{x_k}$ , мм | Выборочное СКО смещения по оси $X$ , $\sigma_{x_k}$ , мм | Выборочное среднее смещения по оси $Y$ , $m_{y_k}$ , мм | Выборочное СКО смещения по оси $Y$ , $\sigma_{y_k}$ , мм | Выборочный коэффициент корреляции $\rho_k$ |
|---------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1                         | 152                                                     | 30                                                       | -37                                                     | 31                                                       | 0,04                                       |
| 2                         | -85                                                     | 31                                                       | -46                                                     | 30                                                       | -0,14                                      |
| 3                         | 163                                                     | 39                                                       | 50                                                      | 33                                                       | 0,11                                       |
| ...                       | ...                                                     | ...                                                      | ...                                                     | ...                                                      | ...                                        |

Продолжение таблицы 8

| Номер реперной точки, $k$ | Выборочное среднее смещения по оси X, $m_{x_k}$ , мм | Выборочное СКО смещения по оси X, $\sigma_{x_k}$ , мм | Выборочное среднее смещения по оси Y, $m_{y_k}$ , мм | Выборочное СКО смещения по оси Y, $\sigma_{y_k}$ , мм | Выборочный коэффициент корреляции $\rho_k$ |
|---------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 48                        | -85                                                  | 31                                                    | -47                                                  | 35                                                    | 0,00                                       |
| 49                        | -109                                                 | 32                                                    | -31                                                  | 33                                                    | 0,13                                       |
| 50                        | -219                                                 | 39                                                    | -148                                                 | 34                                                    | 0,40                                       |

Результаты статистического анализа также подтверждают наличие смещений по осям для каждой точки в отдельности ( $m_{x_k} \neq 0, m_{y_k} \neq 0$ ). Однако, поскольку в основе применяемого метода наименьших квадратов лежит решение оптимизационной задачи минимизации квадрата длины вектора ошибки измерений, то выборочное среднее смещения координат реперных знаков на изображении с видеокамеры относительно эталона, вычисленное по всем точкам равно нулю ( $m_x = \sum_{k=1}^{50} m_{x_k} = 0, m_y = \sum_{k=1}^{50} m_{y_k} = 0$ ).

СКО по осям равны между собой ( $\sigma_{x_k} = \sigma_{y_k} \approx 30$  мкм,  $k = \overline{1, 50}$ ), что по величине совпадает с физическим размером одного пиксела на ЖК-матрице. Если рассматривать смещение в общем по всем реперным знакам (Рисунок 84б, в), то СКО имеет большее значение и не совпадает по осям из-за наличия индивидуального среднего смещения для каждого знака: ( $\sigma_x \approx 90$  мкм,  $\sigma_y \approx 70$  мкм), а коэффициент корреляции равен нулю ( $\rho = 0$ ). На основе проведенного статистического анализа можно предположить два варианта описания несовпадения координат реперных знаков относительно эталона:

- 1) через отдельные функции плотности двумерного нормального распределения для каждого реперного знака с параметрами  $m_{x_k}, m_{y_k}, \sigma_{x_k}, \sigma_{y_k}, \rho_k, k = \overline{1, 50}$ ;
- 2) через общую функцию плотности двумерного нормального распределения одинаковую для всех реперных знаков с параметрами  $m_x = m_y = 0, \sigma_x, \sigma_y, \rho = 0$ .



Второй вариант является более предпочтительным, поскольку требует меньшего количества вычислительных операций. Однако возможность его использования требует проверки, поскольку такое упрощение может значительно изменить значение результирующей вероятности выхода годной заготовки.

Проведена повторная оценка результатов наложения изображений рабочего поля, полученных с видеокамеры, и шаблона, только с использованием алгоритма сеточного совмещения. По графическому наложению (Рисунок 85а) можно увидеть компенсацию алгоритмом постоянной составляющей искажений, т. е. выборочное среднее смещения координат реперных знаков на изображении с видеокамеры относительно эталона для каждой точки равно нулю ( $m_{x_k} = m_{y_k} = 0$ ), как и общее смещение по всем точкам ( $m_x = m_y = 0$ ). СКО для каждой точки и общее по всем точкам совпадают ( $\sigma_{x_k} = \sigma_{y_k} = \sigma_x = \sigma_y \approx 30$  мкм), как и коэффициенты корреляции ( $\rho_k = \rho = 0$ ). Тогда, при применении алгоритма сеточного совмещения возможно корректное описание случайной величины несовпадения координаты реперного знака относительно эталона распределением Рэлея, использованного ранее при описании вероятности выхода годной контактной площадки в процессе сверления (28) с параметром разброса  $\sigma$  (Рисунок 85б).

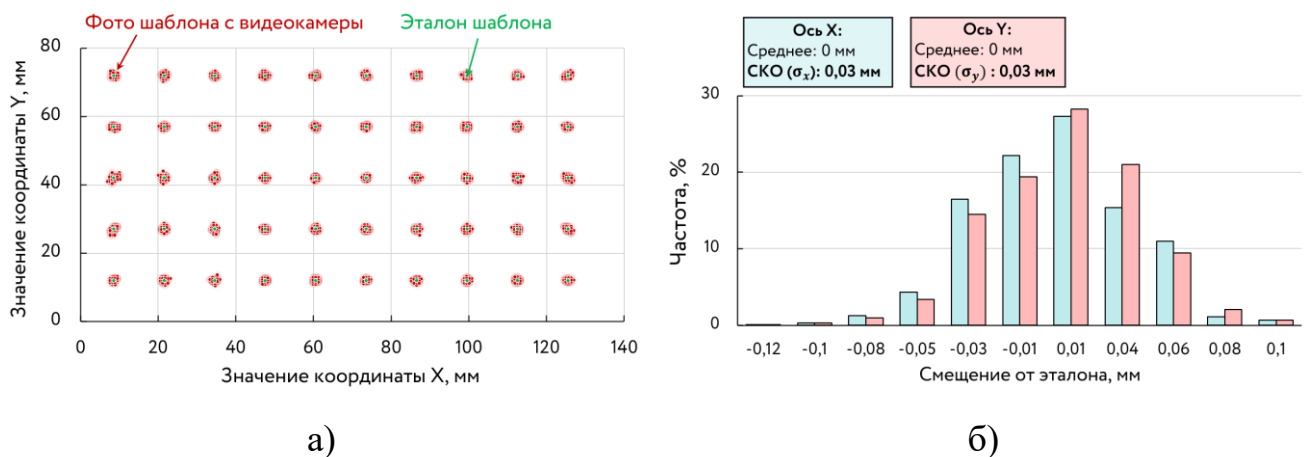


Рисунок 85 — Оценка результатов наложения при применении совмещения на основе конечно-элементной сетки: а) графическое наложение выборки фотографий и оригинала (величина отклонения увеличена в 15 раз); б) гистограмма смещения центра реперного отверстия относительно оригинала

С помощью сформированных законов распределения, описывающих несовпадение координаты реперного знака относительно эталона по формуле (50) определена зависимость вероятности выхода годной заготовки на этапе совмещения от диаметра КП (Рисунок 86) при требуемом диаметре переходного отверстия в КП  $D_{drill} = 1$  мм, что соответствует ранее рассмотренному примеру (Рисунок 816).

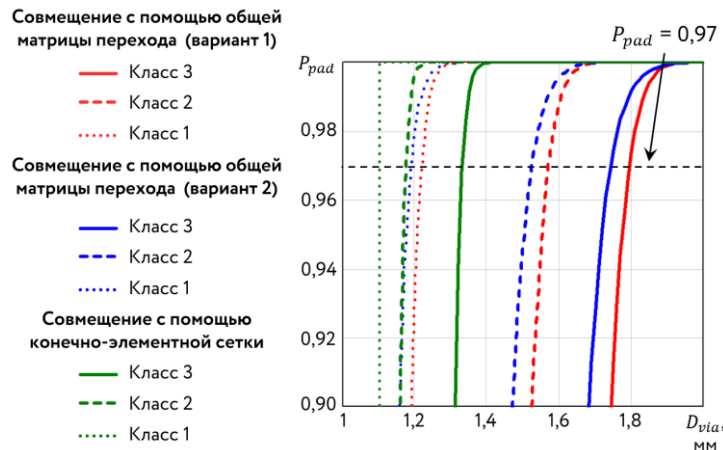


Рисунок 86 — Сравнение вероятности выхода годной заготовки после операции совмещения заготовки в зависимости от используемого алгоритма совмещения и требуемого класса применения изделия

При моделировании предполагается, что на месте реперных знаков должны быть расположены КП. На рисунке 86 вариант 1 получен с помощью выражения смещения через отдельные функции плотности двумерного нормального распределения для каждого реперного знака, вариант 2 — через общую функцию плотности двумерного нормального распределения одинаковую для всех реперных знаков.

На основе проведенного моделирования сделаны следующие выводы:

- В результатах присутствуют различия между двумя вариантами описания смещения для алгоритма, построенного на основе применения общей матрицы перехода (Рисунок 86, красные и синие линии). Так, представление через общую функцию плотности накладывает более жесткие требования, что выражается в увеличении диаметра КП, обеспечивающей тот же уровень вероятности. Однако, с увеличением требуемого уровня вероятности выхода



бездефектной заготовки разница между ними уменьшается. Если нижнюю границу требуемого уровня вероятности считать равной 0,97 (обычно на предприятиях она выше: 0,997 и 0,999997), то максимальная ошибка в определении диаметра КП составляет 50 мкм, что в отношении к абсолютному значению диаметра составляет менее 3 %. Полученная величина ошибки достаточно мала, чтобы считать допустимым использование упрощенного описания смещения через общую функцию плотности для всех реперных знаков.

- Применение способа совмещения на основе КЭ-сетки позволяет значительно уменьшить требуемый размер КП. Для изделий с классом применения 3 возможно уменьшение диаметра КП на 0,4–0,5 мм (Рисунок 86, сравнение сплошных красной и зеленой линии или сравнение сплошных синей и зеленой линий).

#### **4.6 Выводы по главе**

В ходе проведенного исследования для операции совмещения:

- 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 как совокупной вероятности попадания всеми отверстиями в соответствующие КП, что аналогично ранее сформированному критерию для операции сверления. Сформировано условие объединения моделей процессов сверления и совмещения. Определена необходимость исследования изменения характера несовпадения координат топологии относительно эталона по поверхности заготовки для определения и компенсации систематической составляющей смещений.

- Проведено экспериментальное исследование операции совмещения на операции фотолитографии. Разработана конструкция установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы и изготовлен на ее основе экспериментальный образец. с помощью экспериментального образца: подтверждена принципиальная работоспособность предложенной технологии; определены технологические параметры операции экспонирования; решена проблема неравномерности экспозиции, обусловленная конструктивными особенностями оптической составляющей установки (выборочное СКО разброса экспозиции уменьшено в 2 раза); сформированы алгоритмы и разработано программное обеспечение (ПО) для создания шаблонов из производственных файлов ПП и кодирования изображений шаблонов для вывода на ЖК-матрицу.
- Разработаны и экспериментально апробированы алгоритмы совмещения: на основе общей матрицы перехода и на основе КЭ-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 (п. 5.4).
- 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 КЭ-сетки для изделий с классом применения 3 позволяет уменьшить диаметр КП на 0,4–0,5 мм относительно применения совмещения на основе общей матрицы перехода.

## Глава 5. РАЗРАБОТКА ОБЩЕЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ВЫХОДА ГОДНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ПО ИХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ И ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДА НА ЕГО ОСНОВЕ

### 5.1 Модель оценки вероятности выхода годной печатной платы

В ходе проведенного исследования построенные частные модели, описывающие:

- вероятность выхода годной заготовки для процессов воспроизведения проводящего рисунка (фотолитографии и травления, п. 2.2.3)  $P_{route}$  (24);
  - вероятности выхода годных нефункциональных КП металлизированных отверстий  $P_{via\_nf}$  (29), а также КП с подключенным проводником  $P_{via}$  (41) для процесса сверления;
  - вероятности выхода годной заготовки для процессов совмещения  $P_{pad}$  (50);
- объединены в единую модель оценки вероятности выхода годной ПП  $P_{pcb}$  (62), которая представляет из себя произведение вероятностей бездефектного изготовления всех слоев ПП, что справедливо, поскольку частные события вероятности выхода годной заготовки для процессов «фотолитография-травление» и «совмещение-сверление» независимы, а также частные события выхода годных слоев ПП также независимы.

$$P_{pcb} = \prod_{n=1}^{N_{pcb}} \left\{ \left[ \Phi \left( \frac{k_{max} w_{tr\_d_n} - \delta_{expo} - \delta_{etch}}{\sqrt{2(\xi^2 + \sigma_{etch}^2)}} \right) - \Phi \left( \frac{-k_{min} w_{tr\_d_n} - \delta_{expo} - \delta_{etch}}{\sqrt{2(\xi^2 + \sigma_{etch}^2)}} \right) \right] \cdot \prod_{k=1}^{K_n} \iint_{(z_{i_n,k})} \frac{1}{2\pi\sigma_{x_n,k}\sigma_{y_n,k}\sqrt{1-\rho_{n,k}^2}} \cdot e^{\left( \frac{-1}{2(1-\rho_{n,k}^2)} \left[ \frac{(x-m_{x_n,k})^2}{\sigma_{x_n,k}^2} - \frac{2\rho_{n,k}(x-m_{x_n,k})(y-m_{y_n,k})}{\sigma_{x_n,k}\sigma_{y_n,k}} + \frac{(y-m_{y_n,k})^2}{\sigma_{y_n,k}^2} \right] \right)} dx dy \right\}, \quad (62)$$

где:

- $\delta_{expo_n}(w_{tr\_d_n})$  — искажение размеров проводящего рисунка на операции фотолитографии для  $n$ -го слоя;
- $\delta_{etch_n}(h_n, U, F)$  — искажение размеров проводящего рисунка на операции травления для  $n$ -го слоя;

- $\sigma_{etch_n}(h_n, F)$  — неровность края проводника при травлении;
- $m_{x_{n,k}}(m_{x_{n,k,1}} \dots m_{x_{n,k,J}}), \quad m_{y_{n,k}}(m_{y_{n,k,1}} \dots m_{y_{n,k,J}})$  — составляющие систематической погрешности смещения центра  $k$ -ой КП относительно отверстия по осям  $X$  и  $Y$  на  $n$ -ом слое;
- $\sigma_{x_{n,k}}(\sigma_{x_{n,k,1}} \dots, \sigma_{x_{n,k,J}}, \sigma_{drill}), \quad \sigma_{y_{n,k}}(\sigma_{y_{n,k,1}} \dots, \sigma_{y_{n,k,J}}, \sigma_{drill})$  — составляющие случайной погрешности смещения центра  $k$ -ой КП относительно отверстия по осям  $X$  и  $Y$  на  $n$ -ом слое;
- $\rho_{n,k}(\sigma_{x_{n,k,1}} \dots, \sigma_{x_{n,k,J}}, \sigma_{y_{n,k,1}} \dots, \sigma_{y_{n,k,J}}, \rho_{n,k,1}, \dots, \rho_{n,k,J}, \sigma_{drill})$  — коэффициент корреляции между составляющими смещения центра  $k$ -ой КП относительно отверстия по осям  $X$  и  $Y$  на  $n$ -ом слое;
- $k_{max}(i), \quad k_{min}(i)$  — коэффициенты допустимого уменьшения ширины проводника и зазора;
- $z_{i,n,k}(i, w_{tr\_d_n}, w_{tr\_d\_min_n}, D_{via_{n,k}}, D_{drill_k})$  — граница области допустимого смещения центра отверстия относительно  $k$ -ой КП на  $n$ -ом слое.

Переменные модели (62) зависят от следующих конструктивных параметров ПП:

- $N_{pcb}$  — количество проводящих слоев ПП (индекс слоя —  $n = \overline{1, N_{pcb}}$ );
- $K_n$  — количество КП на  $n$ -ом слое (индекс КП —  $k = \overline{1, K_n}$ );
- $w_{tr\_d_n}$  — минимальная проектируемая ширина проводника (зазора) на  $n$ -ом слое;
- $D_{via_{n,k}}$  — диаметр  $k$ -ой КП переходного или монтажного отверстия на  $n$ -ом слое;
- $D_{drill_k}$  — диаметр переходного или монтажного отверстия для  $k$ -ой КП;

параметров технологического процесса:

- $\xi$  — неровность края проводника на операции фотолитографии
- $F$  — фактор травления;
- $U$  — подтравливание;

- $\sigma_{drill}$  — случайная погрешность позиционирования отверстия при сверлении;
- $j$  — количество технологических операций совмещения (индекс технологической операции —  $j = \overline{1, J}$ );
- $m_{x_{n,k,j}}, m_{y_{n,k,j}}$  — систематическая погрешность смещения центра  $k$ -ой КП относительно эталона по осям  $X$  и  $Y$  на  $n$ -ом слое для  $j$ -ой операции;
- $\sigma_{x_{n,k,j}}, \sigma_{y_{n,k,j}}$  — случайная погрешность смещения центра  $k$ -ой КП относительно эталона по осям  $X$  и  $Y$  на  $n$ -ом слое для  $j$ -ой операции;
- $\rho_{n,k,j}$  — коэффициент корреляции между случайными величинами смещения центра  $k$ -ой КП относительно эталона по осям  $X$  и  $Y$  на  $n$ -ом слое для  $j$ -ой операции;

параметры требований приемки:

- $i$  — класс применения ПП;
- $w_{tr\_d\_min_n}$  — минимально допустимая ширина проводника на  $n$ -ом слое.

Модель, которая отражает зависимость вероятности выхода ПП, соответствующей предъявляемым к ней требованиям приемки, от параметров конструкции и технологического процесса, используемого для ее изготовления. Однако, величина требуемого для расчета вероятности  $P_{pcb}$  набора параметров и сложность их определения требует разработки метода оценки выхода годных ПП, автоматизированное определение вероятности производства изделия.

## 5.2 Метод оценки выхода годных печатных плат

Для обеспечения возможности автоматизированного использования модели (62) в процессе производства ПП разработан метод оценки выхода годных ПП, блок-схема которого представлена на рисунке 87.

Метод состоит из нескольких этапов. Этап 1 — ввод конструктивных параметров проектируемой ПП и характеристик технологического процесса ее изготовления, используемых в моделях (62). Возможно использование

производственных файлов проекта ПП для автоматического извлечения параметров из них. При отсутствии априорной информации о параметрах операций технологического процесса необходимо проведение исследования для экспериментального определения параметров операций на тест-купонах (аналогично эксперименту, приведенному в п.2.1.3).

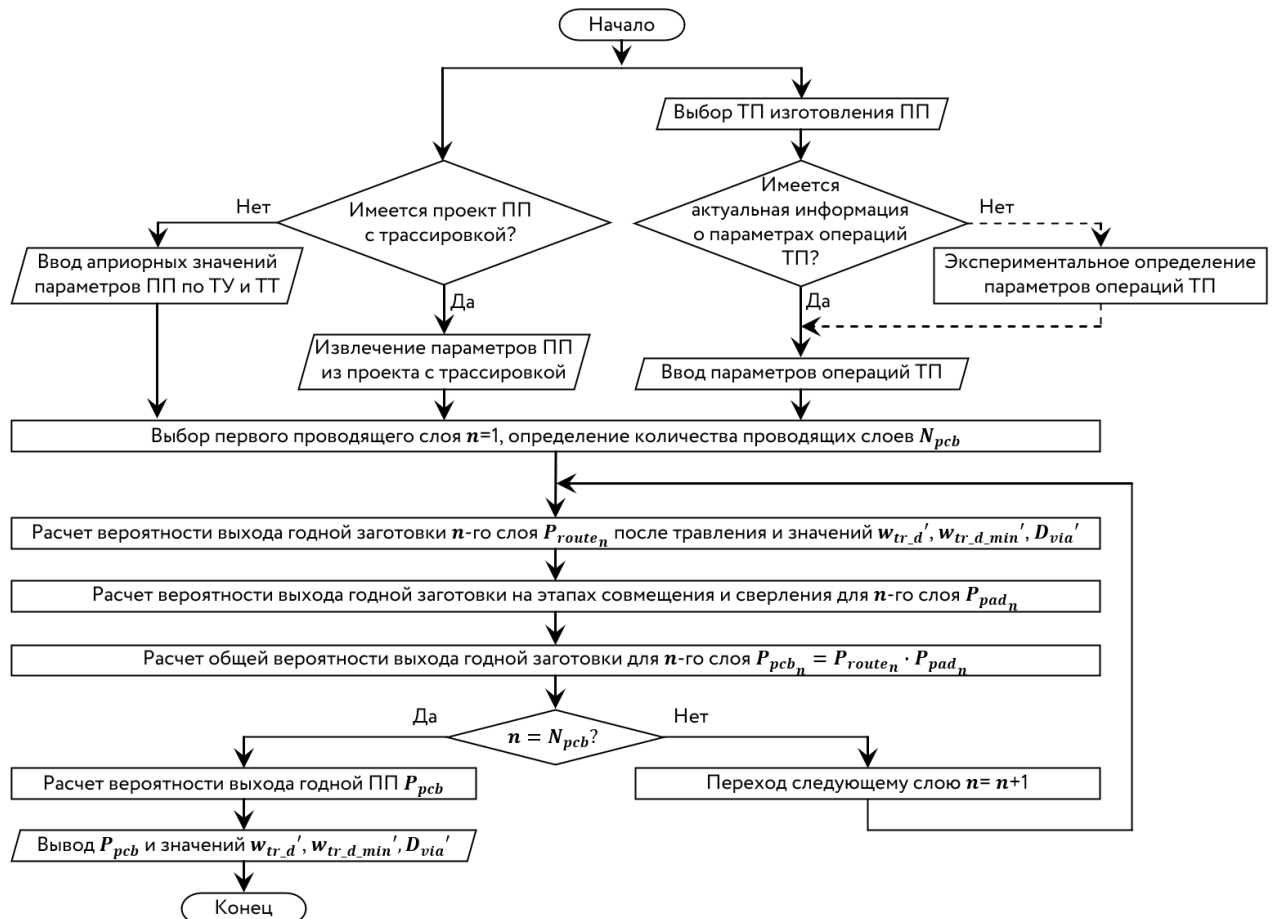


Рисунок 87 — Метод оценки выхода годных ПП

Этап 2 — вычисление вероятности выхода годной заготовки  $n$ -го проводящего слоя ПП  $P_{pcb_n}$ ,  $n = \overline{1, N_{pcb}}$ , где  $N_{pcb}$  — количество слоев ПП. Алгоритм вычисления  $P_{pcb_n}$ :

- 1) Вычисление вероятности выхода годной заготовки на этапах фотолитографии и травления для  $n$ -го проводящего слоя ПП  $P_{route_n}$  на основе модели (24). Для вычисления вероятности используется участок ПП с наибольшей плотностью межсоединений, т. е. участок с наименьшей шириной проводника и зазора между проводниками

$(w_{tr\_d_n} = \min \{w_{tr\_d_{n,s}}\}, w_{clr\_d_n} = \min \{w_{clr\_d_{n,s}}\}$  где  $s = \overline{1, S_n}$  — номер проводника на  $n$ -ом слое ПП,  $S_n$  — количество проводников на  $n$ -ом слое ПП.

- 2) Определение значений ширины проводника  $w_{tr\_d_n}'$  и минимально допустимой ширины проводника  $w_{tr\_d_{min_n}}'$  после операции травления. Значение  $w_{tr\_d_n}'$  определяется как математическое ожидание ширины проводника после травления, а  $w_{tr\_d_{min_n}}'$  можно вычислить на основе информации о классе применения изделия (например, для класса применения 3 допускается уменьшение ширины проводника на 20 %, тогда  $w_{tr\_d_{min_n}}' = 0,8w_{tr\_d_n}$ ) или задать априорно на основе ТУ и ТТ к узлу (Рисунок 88а).

- 3) Вычисление диаметров КП после травления:

$$D_{via_{n,k}}' = D_{via_{n,k}} - (w_{tr\_d_n} - w_{tr\_d_n}').$$

- 4) Вычисление вероятности выхода годной заготовки на этапах сверления и совмещения для  $n$ -го проводящего слоя ПП  $P_{pad_n}$  на основе модели (50).

Для упрощения расчетов предлагается использовать следующие допущения: процесс сверления является несмещенным относительно эталонного положения КП, тогда разброс, привносимый на операции сверления также может быть описан, как составляющая процесса совмещения с параметрами  $\sigma_{x_{drill,k}}, \sigma_{y_{drill,k}}, \rho_{drill,k}$  ( $k = \overline{1, K_n}$  — номер КП на  $k$ -ом слое ПП,  $K_n$  — количество КП на  $n$ -ом слое ПП); в случае отсутствия каплевидных утолщений в области соединения проводника и КП расчетная область  $Z_{i,n,k}'''$  допустимого смещения центра отверстия относительно КП для изделия  $i$ -го класса применения — окружность, вписанная в область  $Z_{i,n,k}$  с радиусом  $R_{C_i}'$  (центр области  $Z_{i,n,k}'''$  совпадает с центром КП, Рисунок 88б).

- 5) Расчет вероятности выхода годной заготовки  $k$ -го проводящего слоя ПП

$$P_{pcb_k} = P_{route_k} \cdot P_{pad_k}.$$

Этап 3 — вычисление вероятности выхода годной ПП  $P_{pcb}$  как произведения вероятностей независимых событий выхода годных заготовок слоев ПП ( $P_{pcb} = \prod_{n=1}^{N_{pcb}} P_{pcb_n}$ ) и представление рассчитанной вероятности оператору.

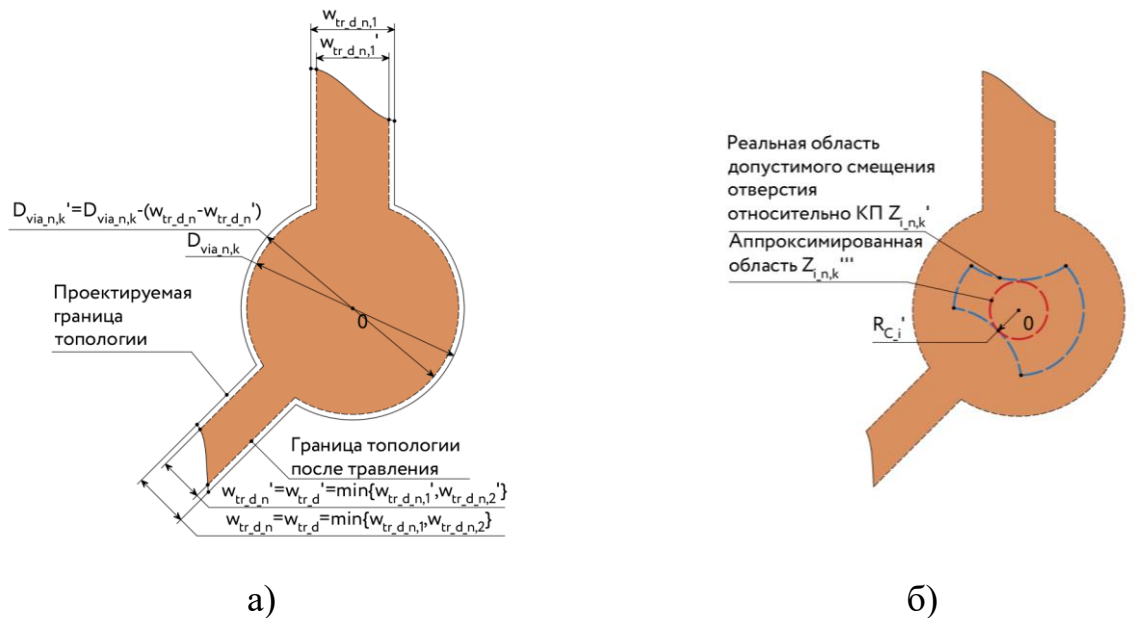


Рисунок 88 — Пояснения к применению метода оценки вероятности выхода годной печатной платы: а) изменение границы топологии в процессе травления; б) упрощение области допустимого смещения центра отверстия для КП

Предложенный метод может быть использован для оценки соответствия проекта ПП технологическим возможностям производства путем сравнения полученной величины вероятности  $P_{pcb}$  с заданным технологическим значением требуемого уровня вероятности  $P_{req}$ . Также, принимая вероятностную величину  $P_{pcb}$  равной статистической величине процента выхода годных, возможно использование  $P_{pcb}$  для прогнозирования количества издержек, что необходимо при экономической оценке целесообразности изготовления проекта ПП и, соответственно, определения размеров производственной партии.

### 5.3 Внедрение метода оценки выхода годной печатной платы

Внедрение метода оценки вероятности выхода годной ПП осуществлено на базе контроллера лабораторного прототипа установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы в качестве отдельного модуля. На рисунке 89 представлена разработанная архитектура ПО.



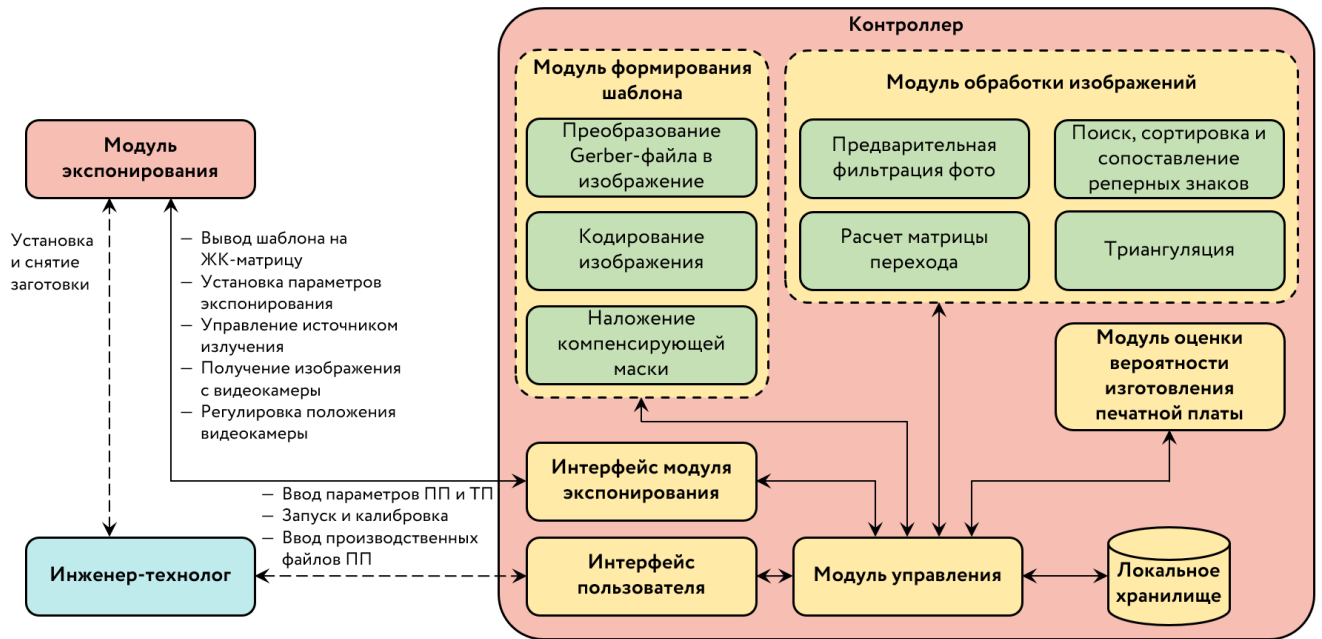


Рисунок 89 — Разработанная архитектура ПО для установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы

ПО состоит из следующих основных модулей (программная реализация представлена в приложении Е):

- 1) Модуль управления, формирующий основную последовательность исполняемых команд для расчета оценки вероятности выхода годной ПП и формирования экспонирования заготовки (модуль «main.py»).
- 2) Модуль формирования шаблона, осуществляющий: преобразование производственных Gerber-файлов в формате RS-274X в черно-белые изображения позитивных или негативных шаблонов с разрешением  $3840 \times 2400$ , соответствующим разрешению ЖК-матрицы; кодирование изображения в соответствии с форматом отображения ЖК-матрицы (модуль «image\_generator.py»).
- 3) Модуль обработки изображений, осуществляющий: распознавание реперных знаков на изображениях шаблона, а также на фотографиях рабочего поля установки, полученных с помощью видеокамеры; представление информации о распознанных реперных знаках в виде списков; сортировку и сопоставление реперных знаков на изображениях с разных источников; расчет матриц перехода; построение конечно-элементной сетки; преобразование изображений с помощью

матриц перехода (модули «dot\_finder.py», «dot\_sorter.py», «mesh\_combiner.py»);

- 4) Модуль оценки вероятности изготовления ПП, осуществляющий функции, необходимые для работы метода (Рисунок 87): загрузку информации о конструктивных параметрах ПП и параметрах ТП из json-файлов; расчет вероятности  $P_{route\_k}$   $k$ -го проводящего слоя ПП, определение значений параметров  $w_{tr\_d'}$ ,  $w_{tr\_d\_min'}$  и  $D_{via'}$  после операции травления; расчет вероятностей  $P_{pad\_k}$ ,  $P_{pcb\_k}$  и  $P_{pcb}$  (модуль «probability\_estimator.py»).

Структуры файлов с параметрами ПП и ТП, используемыми для определения вероятности выхода годной ПП, представлены на примерах (Рисунки 90, 91).

```
{
  "rel_class": 3, // Класс применения ПП
  "layers": // Список проводящих слоев
  [
    {
      "id": 0, // Номер слоя
      "h": 0.018, // Толщина фольги
      "w_tr_d_min": 0.15, // Минимальная ширина проводника на слое
      "vias": // Список с контактными площадками (КП)
      [
        {
          "id": 0, // Номер КП
          "d_via": 1.0, // Диаметр КП
          "d_drill": 0.5, // Диаметр отверстия
          "x": 5, // Координата центра КП по X
          "y": 5, // Координата центра КП по Y
          "conductors": // Список с подключенными к КП проводниками
          [
            {
              "id": 0, // Номер проводника
              "w_tr_d": 0.25, // Проектируемая ширина проводника
              "angle": 0, // Угол подключения
              "is_tear": 1 // Наличие каплевидного утолщения
            }
          ]
        }
      ]
    }
  ]
}
```

Рисунок 90 — Структура json-файла с конструктивными параметрами ПП

```

{
  "lithography": // Параметры операции фотолитографии
  {
    "distortion": 0.0, // Искажение размеров проводящего рисунка
    "roughness": 0.02 // Неровность воспроизведения проводника
  },
  "etching": // Параметры операции травления
  {
    "distortion": 0.0, // Искажение размеров проводящего рисунка
    "etching_factor": 2 // Фактор травления
  },
  "drilling":
  {
    "std_x": 0.01, // СКО смещения центра отверстия относительно эталона по оси
X
    "std_y": 0.01, // СКО смещения центра отверстия относительно эталона по оси
Y
    "cor": 0.0 // Коэффициент корреляции смещения отверстия между осями X и Y
  },
  "overlay":
  {
    "m_x": 0.0, // Математическое ожидание смещения центра реперной точки
относительно эталона по оси X
    "std_x": 0.03, // СКО смещения КП относительно эталона по оси X
    "m_y": 0.0, // Математическое ожидание смещения центра реперной точки
относительно эталона по оси Y
    "std_y": 0.03, // СКО смещения КП относительно эталона по оси Y
    "cor": 0.0 // Коэффициент корреляции смещения КП между осями X и Y
  }
}

```

Рисунок 91 — Структура json-файла с характеристиками ТП изготовления ПП

Проведена экспериментальная проверка работоспособности модуля расчета вероятности выхода годной ПП на тестовой топологии, используемой при исследовании операции совмещения (п. 4.4.1, п. 4.4.2, Рисунок 92), на которой присутствуют четыре участка с разными конструктивными параметрами, для каждого из которых рассчитана собственная вероятность выхода годных.

Конструктивные параметры проекта ПП:

- проектируемая ширина проводника  $w_{tr\_d}$  равна минимально допустимой  $w_{tr\_d\_min}$  ( $w_{tr\_d} = w_{tr\_d\_min}$ ): область 1 — 0,2 мм; область 2 — 0,3 мм; область 3 — 0,4 мм; область 4 — 0,5 мм;
- диаметр контактной площадки  $D_{via}$ : область 1 — 1,3 мм; область 2 — 1,4 мм; область 3 — 1,6 мм; область 4 — 1,8 мм;

- диаметр отверстий — 1 мм;
- количество контактных площадок на область: 45;
- толщина проводящего слоя: 18 мкм;
- количество проводящих слоев: 1.

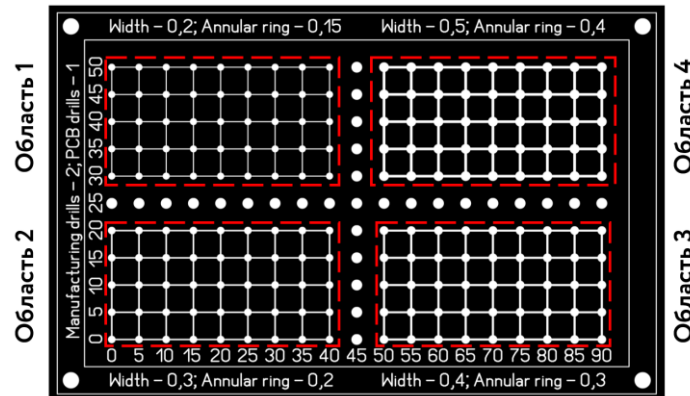


Рисунок 92 — Тестовая топология для расчета вероятности выхода годной ПП

В рассматриваемом случае предполагается изготовление ОПП субтрактивным методом при проведении операции сверления монтажных отверстий перед травлением. Используемые параметры ТП:

- искажение размеров проводящего рисунка на операциях фотолитографии  $\delta_{expo}$  и травления  $\delta_{etch}$  принято равным нулю ( $\delta_{expo} = \delta_{etch} = 0$ );
- неровность воспроизведения края проводника  $\xi$  — 20 мкм, что соответствует половине величины диагонали пикселя, на которую может сместиться край проводника в результате ошибок растеризации ЖК-матрицей;
- фактор травления — 2, что соответствует лабораторным условиям;
- погрешности совмещения и сверления одинаковы для всех КП, их параметры  $m_x = m_y = 0$ ,  $\sigma_x = \sigma_y = 0,03$  мм,  $\rho = 0$ ; значения соответствуют использованию КЭ-алгоритма совмещения; отсутствие влияния погрешности сверления также обусловлено применением алгоритма, который вносит соответствующее изменению положения отверстия искажение в шаблон.

В результате работы программы получены следующие значения вероятности выхода годной ПП в зависимости от требуемого класса применения и наличия каплевидных КП (Таблица 9).

Таблица 9 — Рассчитанные вероятности выхода годных областей тестовой топологии (в скобках приведены экспериментальные частоты выхода годных)

| Область заготовки                                      | Без каплевидных КП     |                        |                        | С каплевидными КП      |                        |                        |
|--------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                                        | Класс 3                | Класс 2                | Класс 1                | Класс 3                | Класс 2                | Класс 1                |
| 1: ( $w_{tr\_d\_min} = 0,2$ мм,<br>$D_{via} = 1,3$ мм) | <b>0</b><br>(0)        | <b>0</b><br>(0)        | <b>0</b><br>(0)        | <b>0,223</b><br>(0,15) | <b>0,895</b><br>(0,92) | <b>0,968</b><br>(0,92) |
| 2: ( $w_{tr\_d\_min} = 0,3$ мм,<br>$D_{via} = 1,4$ мм) | <b>0</b><br>(0)        | <b>0</b><br>(0)        | <b>0</b><br>(0)        | <b>0,954</b><br>(0,96) | <b>0,994</b><br>(0,96) | <b>0,999</b><br>(0,96) |
| 3: ( $w_{tr\_d\_min} = 0,4$ мм,<br>$D_{via} = 1,6$ мм) | <b>0,910</b><br>(0,85) | <b>0,914</b><br>(0,85) | <b>0,922</b><br>(0,85) | <b>0,999</b><br>(0,93) | <b>0,999</b><br>(0,94) | <b>0,999</b><br>(0,94) |
| 4: ( $w_{tr\_d\_min} = 0,5$ мм,<br>$D_{via} = 1,8$ мм) | <b>0,999</b><br>(0,96) | <b>0,999</b><br>(0,96) | <b>0,999</b><br>(0,96) | <b>0,999</b><br>(1)    | <b>0,999</b><br>(1)    | <b>0,999</b><br>(1)    |

Для проверки полученных результатов изготовлена опытная партия из 200 заготовок и для каждой определено ее соответствие требованиям приемки по ранее рассмотренным критериям с помощью электронного микроскопа (Рисунок 93).

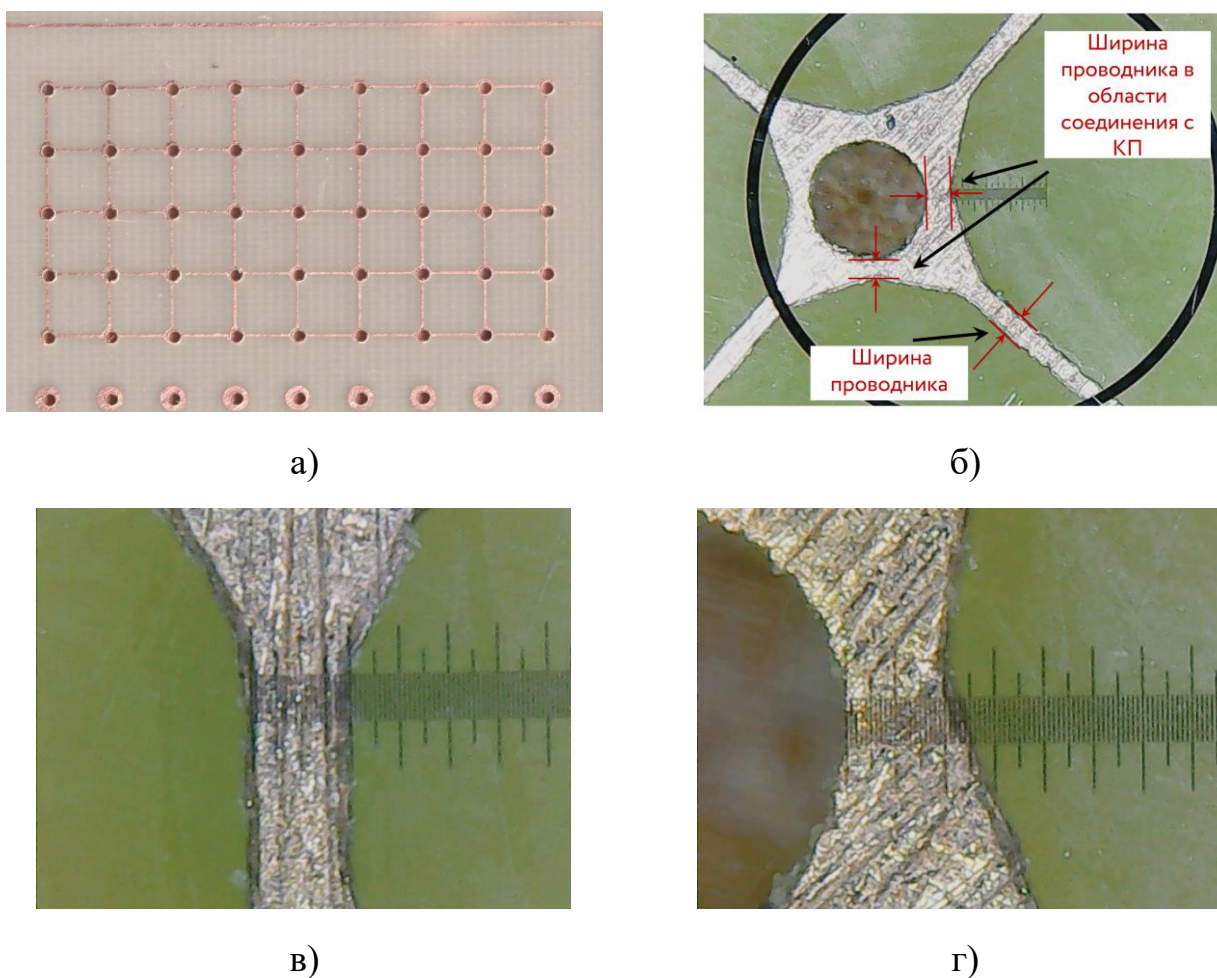


Рисунок 93 — Экспериментальная апробация метода: а) внешний вид заготовки без каплевидных КП (область 1); б) контролируемые размеры на заготовке; в) результат измерения ширины проводника (цена деления 10 мкм); г) результат измерения гарантийного пояса (цена деления 10 мкм)

На каждой области в случайных местах проведено по 20 измерений ширины проводника, размера гарантийного пояса, ширины проводника в области соединения с КП, а также определены экстремальные значения параметров. Расхождение между результатами моделирования и экспериментальными данными составляет не более 8 процентов, статистическая значимость модели (62) подтверждена с помощью критерия Фишера (уровень значимости 0,05).

При рассмотрении случаев с каплевидными КП итоговая вероятность выхода годной ПП в большей степени определяется процессами фотолитографии и травления. с учетом использования при расчетах достаточно тонкой толщины фольги можно считать, что процесс травления также незначительно влияет на результат. Таким образом, основной причиной низкой вероятности выхода годных при малых значениях ширины проводника является низкая разрешающая способность ЖК-матрицы.

#### **5.4 Методика определения конструктивно-технологических параметров для печатной платы**

С практической точки зрения, применение разработанных модели (62) и метода может являться затруднительным для использования на этапах разработки или проектирования ПП, в отличие от этапа непосредственного производства, поскольку отражают влияние конструктивно-технологических параметров на вероятность выхода годных заготовок. В таком случае, интерес составляет результат решения обратной задачи, а именно определение совокупного набора конструктивно-технологических параметров, которые будут обеспечивать заданный в виде исходного требования необходимый уровень вероятности выхода годных.

Аналитическое решение задачи поиска набора конструктивно-технологических параметров, обеспечивающего заданный уровень вероятности, затруднителен, поскольку требует: определения обратной функции от функции вероятности  $P_{route}$ , которая является неэлементарной, а также последующего выражения взаимосвязей между интересующими параметрами.

Поэтому для поиска решения, на основе численных методов, предложена методика определения конструктивно-технологических параметров для ПП (Рисунок 94).

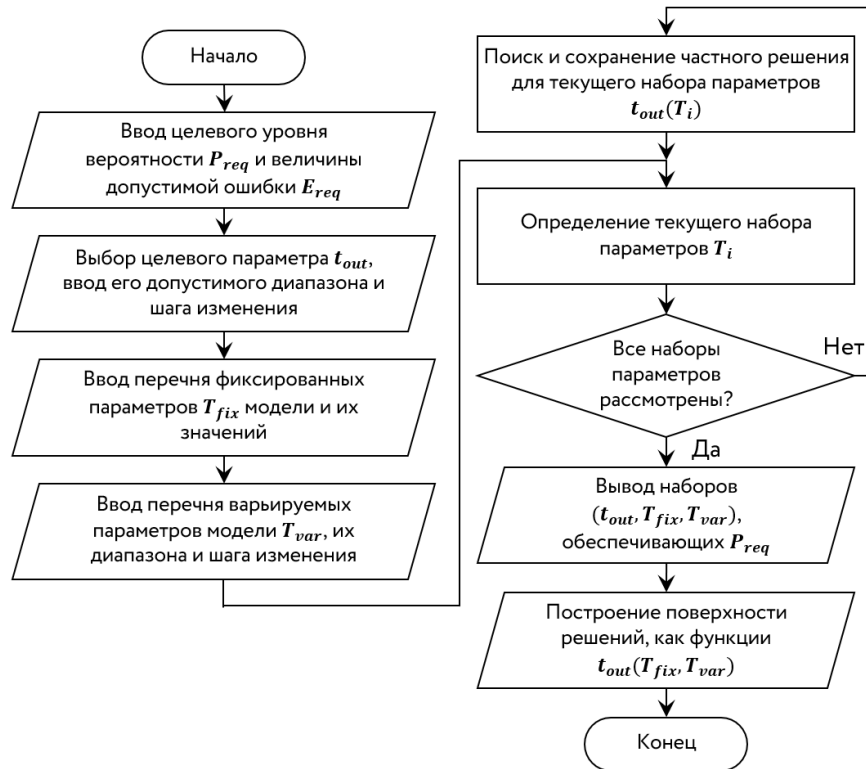


Рисунок 94 — Блок-схема методики определения конструктивно-технологических параметров для ПП

Сначала необходимо задать целевое значение функции вероятности  $P_{req}$ , которое должно быть обеспечено, затем осуществляется выбор целевого параметра  $t_{out}$ , который представляет интерес. Так, при создании конструкции ПУ основным параметром можно считать ширину проводника и зазора между проводника или толщину слоя медной фольги, а при производстве — параметры ТО. Поскольку методика предполагает численное решение, то также необходимо задать допустимый диапазон изменения параметра  $t_{out}$  и шаг  $\Delta t_{out}$ :  $t_{out} \in \{t_{out\_min}, t_{out\_min} + \Delta t, \dots, t_{out\_max}\}$ .

Затем необходимо разбить оставшийся набор параметров на две группы: фиксированные и варьируемые. К фиксированным относятся параметры  $T_{fix}$ , значения  $t_{fix_i}$ ,  $i = \overline{1, n}$  которых уже заданы:

$$T_{fix}^T = (t_{fix_1} \quad \dots \quad t_{fix_n}),$$

где:

- $T_{fix}^T$  — вектор фиксированных параметров;
- $t_{fix_i}$  — значение  $i$ -го фиксированного параметра;
- $n$  — количество фиксированных параметров.

К варьируемым относятся параметры  $T_{var}$ , влияние которых на целевой параметр  $t_{out}$  требуется оценить. Для полного определения варьируемых параметров требуется установить диапазон изменения для каждого параметра  $t_{var_i}$  и шаг  $\Delta t_{var_i}$ :

$$\begin{aligned} T_{var\_min}^T &= (t_{var\_min_1} \quad \cdots \quad t_{var\_min_m}), \\ T_{var\_max}^T &= (t_{var\_max_1} \quad \cdots \quad t_{var\_max_m}), \\ \Delta T_{var\_max}^T &= (\Delta t_{var_1} \quad \cdots \quad \Delta t_{var_m}), \end{aligned}$$

где:

- $T_{var\_min}^T$  — вектор минимальных значений диапазона варьируемых параметров;
- $t_{var\_min_i}$  — минимальное значение диапазона  $i$ -го варьируемого параметра;
- $T_{var\_max}^T$  — вектор максимальных значений диапазона варьируемых параметров;
- $t_{var\_max_i}$  — максимальное значение диапазона  $i$ -го варьируемого параметра;
- $\Delta T_{var\_max}^T$  — вектор с шагами изменения варьируемых параметров;
- $\Delta t_{var_i}$  — шаг изменения  $i$ -го варьируемого параметра;
- $m$  — количество варьируемых параметров.

На следующем шаге формируется буфер с набором параметров  $\{T_{fix}, T_{var_i}\}$  ( $i$  — номер текущего набора параметров), для которого осуществляется поиск частного решения — значения  $t_{out}$ , которое удовлетворяет требованию заданной вероятности  $P_{req}$  (Рисунок 95). Задачей этого шага является решение задачи оптимизации, т. е. определение такого значения величины  $t_{out}$ , которое обеспечит минимальное отклонение полученного значения вероятности от требуемого.



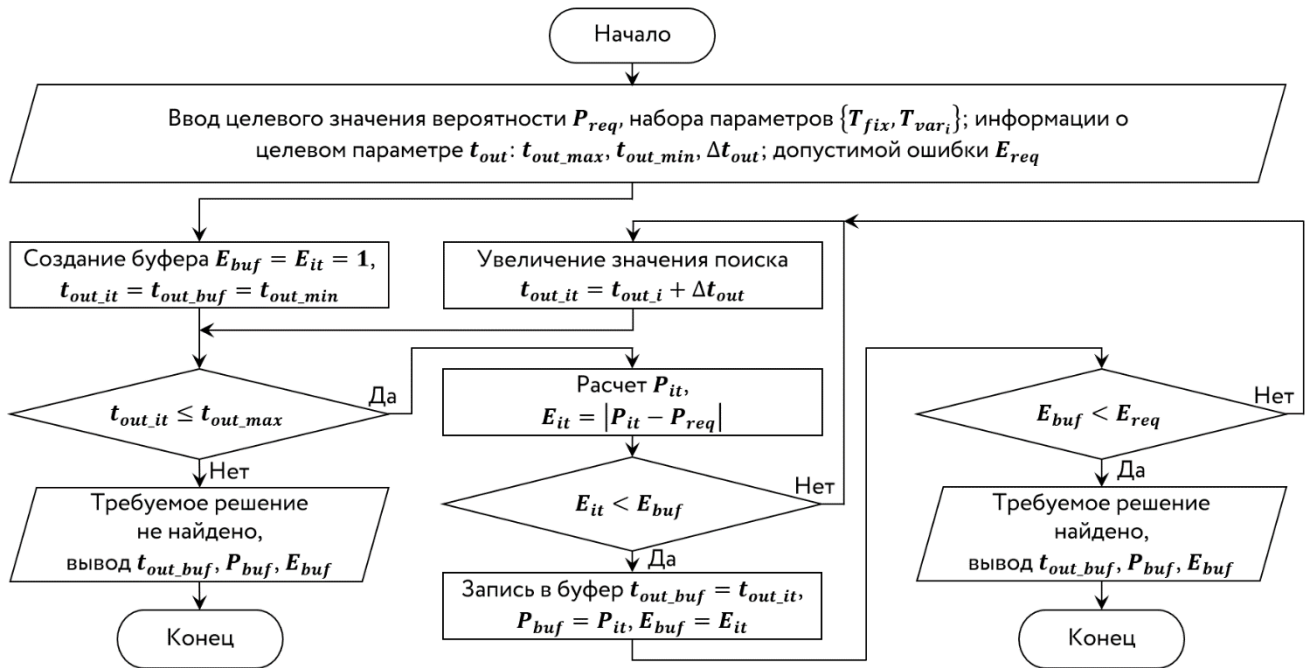


Рисунок 95 — Блок-схема алгоритма поиска частного решения  $t_{out}$  для набора параметров  $\{T_{fix}, T_{var}\}$

Алгоритм поиска частного решения включает в себя следующие шаги:

- 1) Ввод параметров  $\{T_{fix}, T_{var}\}$ , целевой вероятности  $P_{req}$  и информации о целевом параметре  $t_{out}$ , а также допустимой величины ошибки — отклонения рассчитанного значения вероятности от требуемого  $E_{req}$ ;
- 2) Создание буферных переменных  $E_{buf}$ ,  $P_{buf}$ ,  $t_{out\_buf}$ , хранящих информацию о локальном решении: величине ошибки, значении вероятности и целевом параметре, соответственно, а также переменных  $E_{it}$ ,  $P_{it}$ ,  $t_{out\_it}$  для хранения результатов на итерации вычисления;
- 3) Итерационное вычисление значения  $P_{it}$  и  $E_{it}$ , варьируя  $t_{out\_it}$  от  $t_{out\_min}$  до  $t_{out\_max}$  с шагом  $\Delta t_{out}$ : в случае, если полученная на текущей итерации ошибка по абсолютному значению меньше значения в буфере  $E_{it} < E_{buf}$ , то буферные переменные перезаписываются на текущий результат.
- 4) Определение сходимости к искомому решению: если  $E_{buf} < E_{req}$ , то требуемая точность достигнута и требуемая величина  $t_{out}(T_{fix}, T_{var_i})$  найдена; в противном случае — переход к следующему значению  $t_{out}$ .

- 5) В случаях если на всем диапазоне варьирования  $t_{out}$  не достигнута требуемая точность, то необходимо вывести результат с наименьшим значением ошибки  $E_{buf}$ .

Предложенный алгоритм (Рисунок 95) имеет высокую вычислительную сложность и низкую скорость расчета. Добавление дополнительных ограничений на рассматриваемую функцию позволит использовать более быстрые алгоритмы, например, при добавлении ограничения на монотонность функции  $P_{route}$ , задача может быть решена методом Ньютона [108]. Также возможно использование генетических алгоритмов [115, 116] или методов Монте-Карло [117] и применение алгоритмов вычисления обратных функций распределений [118].

Изменяя значения параметров  $T_{var}$  по аналогичному принципу, применяемом при поиске частного решения  $t_{out}(T_{fix}, T_{var_i})$ , можно в табличном виде определить поверхность  $t_{out}(T_{fix}, T_{var})$ , отражающую взаимосвязь параметров между собой при выполнении условия достижения вероятности  $P_{req}$ . На рисунке 96 представлено поэтапное применение методики определения конструктивно-технологических параметров для ПП на примере формирования зависимости минимальной проектируемой ширины проводника  $w_{tr\_d}$  от толщины проводящего слоя  $h$ .

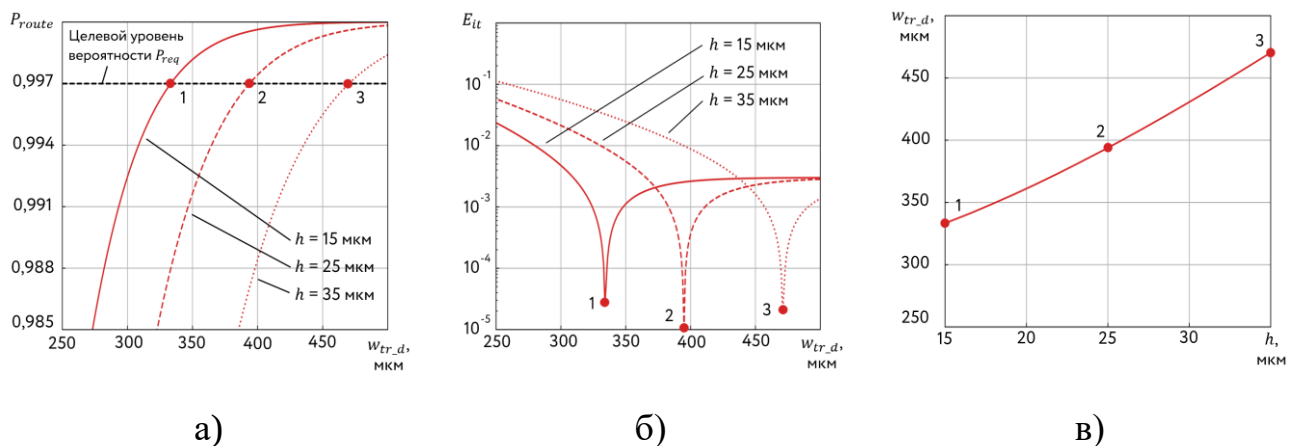


Рисунок 96 — Определение взаимосвязи между параметрами модели  $P_{route}$  (24) при заданном уровне вероятности: а) построение семейства кривых вероятности б) поиск минимума функции ошибки для заданного семейства кривых; в) построение функции взаимосвязи  $w_{tr\_d}(h)$

Целевой параметр  $w_{tr\_d}$  изменяется в пределах от 250 до 500 мкм с шагом 1 мкм, варьируемый параметр  $h$  — в пределах от 15 до 35 мкм с шагом 10 мкм, требуемый уровень вероятности  $P_{req} = 0,997$ , требуемая ошибка вероятности  $E_{req} < 10^{-6}$ . Фиксированные параметры: неровность воспроизведения края проводника  $\xi = 14$  мкм, фактор травления  $F = 2$ , искажения размеров проводящего рисунка:  $\delta_{expo} = \delta_{etch} = 0$ , требуемый класс применения изделия — 3.

На первом этапе определены кривые вероятности  $P_{route}$  для интересующего диапазона параметра  $h$  (Рисунок 96а). На втором рассчитана величина ошибки  $E_{it}$  при поиске оптимального параметра (Рисунок 96б) — по рисунку видно, что, требуемой точности достичь не удалось ( $E_{req} < 10^{-6}$ ), поэтому в дальнейшем использованы полученные точки минимумов функций  $E_{it}(w_{tr\_d}, h)$ . Проблему с точностью полученного решения возможно решить путем уменьшения шага варьирования  $w_{tr\_d}$ . На завершающем этапе (Рисунок 96в) по полученным точкам построена функция  $w_{tr\_d}(h)$ , обеспечивающая требуемую вероятность выхода годной заготовки 0,997.

С помощью разработанной методики проведено моделирование, в которого построены зависимости минимальной проектируемой ширины проводника  $w_{tr\_d}$ :

- от толщины проводящего слоя  $h$  (Рисунок 97а) при изменении требуемого уровня вероятности  $P_{req}$  и условиях:  $\delta_{expo} = \delta_{etch} = 0$ ,  $\xi = 4$  мкм,  $F = 5$ , класса применения 3;
- от характеристик операции фотолитографии и травления (Рисунок 97б) при изменении неровности воспроизведения края проводника  $\xi \in [4, 4,2 \dots 14]$  мкм и фактора травления  $F \in [2, 2,06 \dots 5]$  и условиях:  $\delta_{expo} = \delta_{etch} = 0$ ,  $\xi = 4$  мкм,  $h = 35$  мкм, класс применения 3,  $P_{req} = 0,997$ .

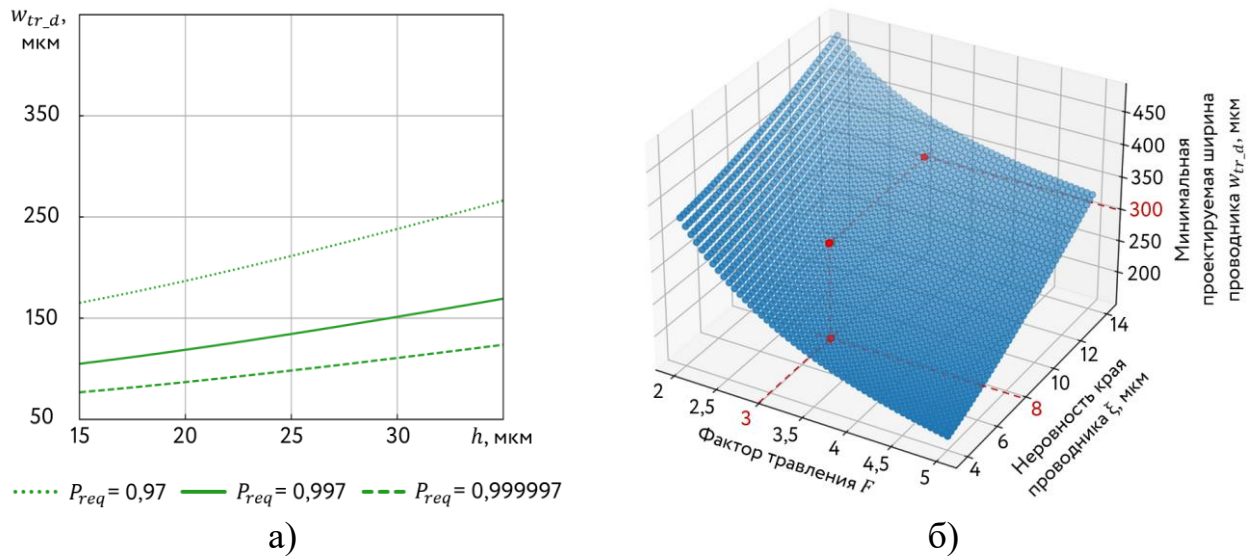


Рисунок 97 — Определение пределов технологических возможностей производства: а) влияние уровня вероятности на  $P_{expo}$  на функцию  $w_{tr\_d}(h)$ ; б) влияние технологических параметров  $\xi$  и  $F$  на величину  $w_{tr\_d}$  для класса применения 3 и  $P_{req} = 0,997$

Разработанная методика позволяет:

- на этапе разработки печатного узла — определить минимальную ширину проводника и зазора между проводниками, а также получить количественную оценку требуемой величины запаса по конструктивным параметрам для увеличения качества изделия (Рисунок 97а);
- на этапе производства изделий — устанавливать пределы технологических возможностей производства, в зависимости от характеристик используемого оборудования (Рисунок 97б, например, для фактора травления 3 и неровности края 8 мкм минимальная ширина проводника должна быть больше 300 мкм), а также на основе вероятности выхода годных прогнозировать величину издержек и формировать стоимость изготовления ПП по ее проекту;
- на этапе формирования производства — прогнозировать уровень обеспечиваемого качества изделий для производственной линии, оценивать возможности по ее улучшению не только с точки зрения заявленных производителем оборудования характеристик, но и с точки

зрения влияния их внедрения на изменение выходного качества продукции (Рисунок 97б).

Применяя к выражениям (32) и (41) разработанную методику, построены зависимости минимального диаметра КП  $D_{via}$  от минимально допустимой ширины проводника  $w_{tr,d,min}$  для КП разного вида: с проводником, каплевидной и нефункциональной (Рисунок 98).

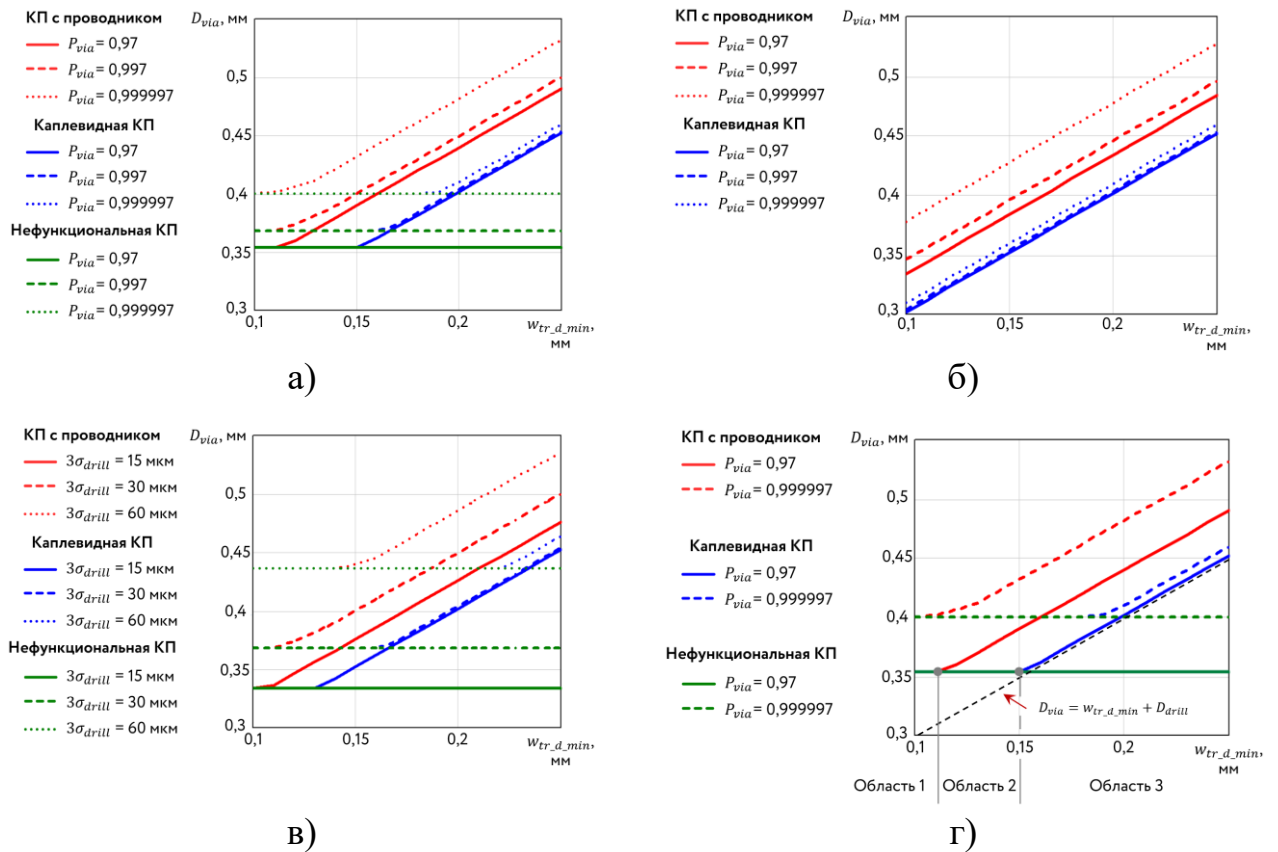


Рисунок 98 — Зависимости диаметра КП от минимально допустимой ширины проводника: а), б) при изменении требуемого уровня вероятности выхода годной КП  $P_{via}$  для классов применения 3 и 2 соответственно; в) при изменении точности позиционирования сверлильного оборудования; г) пояснения характера зависимостей — условия моделирования аналогичны случаю на рисунке а)

Так как в общем виде модель для определения вероятности выхода годной каплевидной КП отсутствует, а разработанные ранее частные модели не могут быть использованы (модель для  $P_{via\_nf}$  (32) не учитывает подключение проводника, а модель для  $P_{via}$  (41) не учитывает геометрию утолщения и соответствующее ей увеличение вероятности). Поэтому определение характера зависимостей осуществлено путем определения численными методами  $D_{via}$  по модели (41) для

случая  $w_{tr\_d} = w_{tr\_d\_min}$  и последующего определения численными методами нового значения  $D_{via}'$  по модели (41), устремляя в ней  $w_{tr\_d}$  к  $D_{via}$ , тем самым нивелируя влияние подключенного проводника.

При моделировании произведено варьирование требуемого уровня вероятности и точности позиционирования сверлильного станка. Общие для всех случаев параметры моделирования:  $D_{drill} = 0,2$  мм;  $w_{tr\_d} = w_{tr\_d\_min}$ . Частные параметры моделирования:

- 1) Рисунок 98а: класс применения — 3;  $3\sigma_{drill} = 30$  мкм; варьируется требуемый уровень вероятности  $P_{via} \in \{0,97; 0,997; 0,999997\}$ ;
- 2) Рисунок 98б: класс применения — 2;  $3\sigma_{drill} = 30$  мкм; варьируется требуемый уровень вероятности  $P_{via} \in \{0,97; 0,997; 0,999997\}$ , прямые для нефункциональной КП не показаны, так как имеют меньшие значения  $D_{via}$ ;
- 3) Рисунок 98в: класс применения — 3;  $P_{via} = 0,997$ ; варьируется точность сверлильного оборудования  $3\sigma_{drill} \in \{15; 30; 60\}$  мкм.

На основе проведенного моделирования сформированы выводы, описывающие общий характер поведения зависимостей.

Зависимость минимального диаметра КП  $D_{via}$  от минимально допустимой ширины проводника  $w_{tr\_d\_min}$  для КП с подключенным проводником может быть аппроксимирована кусочно-заданной функцией  $D_{via}(w_{tr\_d\_min})$ , состоящей из двух частей: плато и прямой (Рисунок 98г):

$$D_{via}(w_{tr\_d\_min}) = \begin{cases} C_1 \\ w_{tr\_d\_min} + C_2 \end{cases}, \quad (63)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — параметры, зависящие от формы КП, класса применения изделия, точности оборудования  $3\sigma_{drill}$  и требуемой вероятности выхода годной КП  $P_{via}$ .

Плато описывает участок, на котором минимально допустимая ширина проводника  $w_{tr\_d\_min}$  настолько мала, что подключенный проводник не влияет на уменьшение области  $Z_i'$  (Рисунок 98г, красная сплошная линия, область 1), поэтому значения  $D_{via}$  совпадают с значениями, полученным для нефункциональной КП. Прямая описывает участок, на котором подключенный

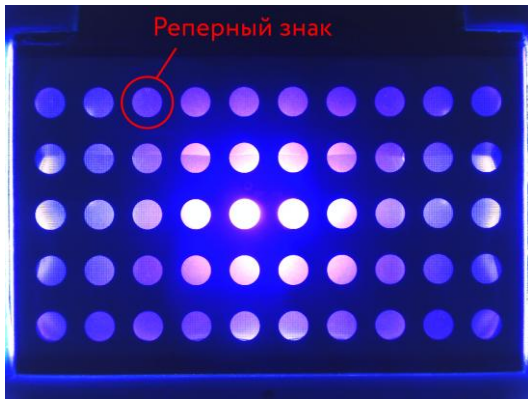
проводник  $w_{tr\_d\_min}$  уменьшает область  $Z_i'$ , для компенсации которого происходит увеличение  $D_{via}$  (Рисунок 98г, красная сплошная линия, области 2 и 3).

Соотношение, связывающее диаметр каплевидной КП  $D_{via}$  и диаметр отверстия  $D_{drill}$  также может быть описано выражением (63). Устремление  $w_{tr\_d}$  к  $D_{via}$  определяет предельный случай участка линейного возрастания  $D'_{via}(w_{tr\_d\_min}) = w_{tr\_d\_min} + D_{drill}$  (Рисунок 98г, черная пунктирная линия). Величина отклонения от предельного случая растет с увеличением разброса сверлильного оборудования  $3\sigma_{drill}$  и требуемой вероятностью  $P_{via}$ .

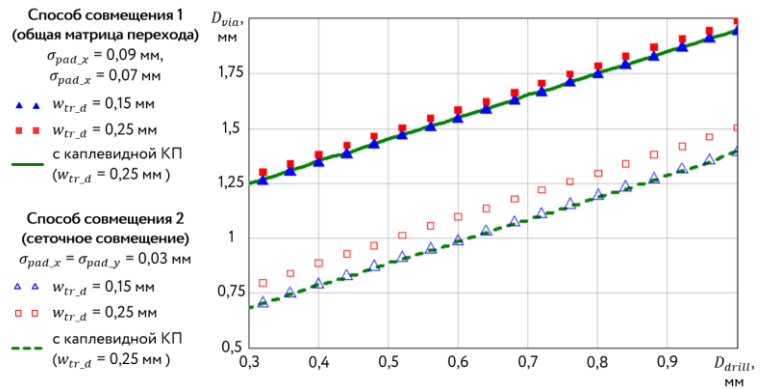
Изменение класса применения ПУ в большей степени влияет на значение параметра  $C_1$ , чем на  $C_2$  (Рисунок 98а, б), что согласуется с предыдущими результатами (п. 3.4) — разница между результатами моделирования для нефункциональных КП разных классов существенна, для КП с подключенным проводником — практически отсутствует.

Представленные результаты моделирования демонстрируют возможность значительного снижения диаметра КП при использовании каплевидной формы, однако конкретная величина уменьшения зависит совокупности остальных конструктивных параметров, точности позиционирования и требуемой вероятности. На основе распространенного в настоящее время примера с параметрами:  $D_{via} = 0,4$  мм;  $D_{drill} = 0,2$  мм;  $w_{tr\_d} = w_{tr\_d\_min} = 0,15$  мм  $P_{via} = 0,997$ ; можно оценить прогнозируемое уменьшение диаметра на 50 мкм или 12 %.

Аналогичным образом можно оценить точность процесса совмещения, реализованного с помощью разработанных алгоритмов на основе общей матрицы перехода (п. 4.4.1) и КЭ-сетки (п. 4.4.2). При моделировании использованы статистические данные полученные ранее при исследовании совмещения шаблона и заготовки, реализованного в прототипе системы прямого экспонирования (п. 4.5, Рисунок 99а).



а)



б)

Рисунок 99 — Определение влияния алгоритма совмещения на требуемые конструктивные параметры ПП: а) пример фотографии шаблона из выборки изображений, используемых при анализе б) зависимости диаметра КП от диаметра отверстия при применении разных алгоритмов совмещения; системы прямого экспонирования

Исходные данные для моделирования:

- требуемый уровень вероятности выхода годной заготовки:  $P_{pad} = 0,997$ ;
- класс применения изделия: 3;
- количество реперных знаков: 50;
- конструктивные параметры заготовки: проектируемая ширина проводника равна минимально допустимой  $w_{tr\_d} = w_{tr\_d\_min} = \{0,15; 0,25\}$ , также рассмотрен вариант с применением каплевидной КП при  $w_{tr\_d} = 0,25$  мм;
- обобщенные статистические характеристики совмещения, полученного при использовании общей матрицы перехода:  $m_x = m_y = 0$  мм,  $\sigma_x = 0,09$  мм,  $\sigma_y = 0,07$  мм,  $\rho = 0$ ;
- обобщенные статистические характеристики совмещения, полученного при использовании КЭ-сетки:  $m_x = m_y = 0$  мм,  $\sigma_x = \sigma_y = 0,03$  мм,  $\rho = 0$ .

Тогда, считая, что в центрах реперных знаков находятся КП, можно построить зависимости требуемого диаметра КП  $D_{via}$  от диаметра отверстия  $D_{drill}$  (Рисунок 99б). По полученным графикам можно увидеть, что в предельном случае (при сравнении результатов, полученных при применении каплевидных КП, Рисунок 99б, зеленые сплошная и пунктирная линии) сеточное совмещение позволяет существенно уменьшить требуемый диаметр КП на 0,55 мм или



уменьшить минимально допустимое проектируемое значение пояска КП в 2,3 раза (с 0,47 мм до 0,2 мм) и, соответственно, увеличить плотность трассировки. Также можно заметить, что с увеличением точности операции совмещения необходимость в применении каплевидных КП увеличивается (Рисунок 99б, сравнение разницы между линиями красных и синих маркеров для разных способов совмещения).

### 5.5 Рекомендации по практическому применению составляющих метода оценки выхода годных печатных плат

Используя составляющие метода оценки выхода годных ПП, предложена диаграмма процесса производства ПП, расширенная обратными связями по контролю качества изделия (Рисунок 100).

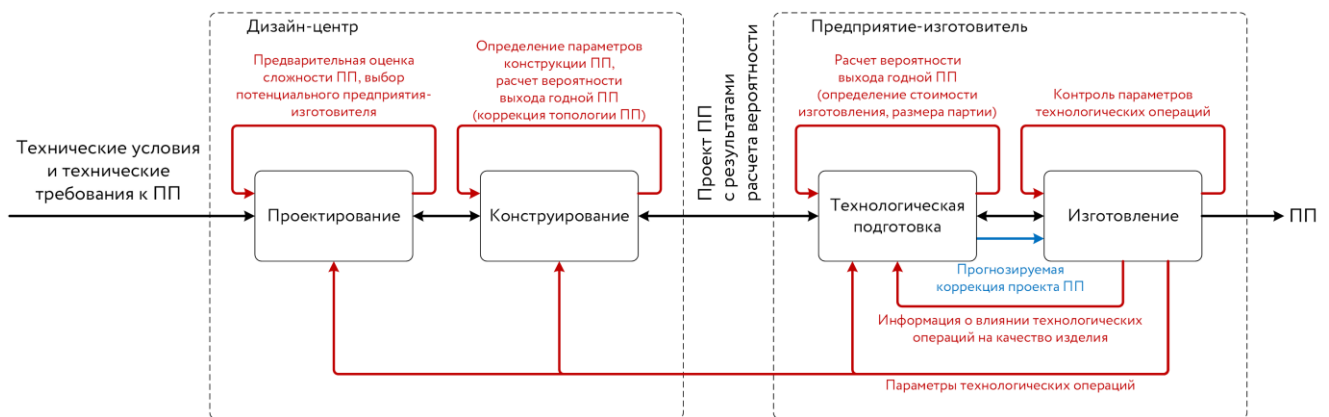


Рисунок 100 — Диаграмма процесса производства ПП с учетом внедрения составляющих метода оценки выхода годных ПП

На основе диаграммы сформированы рекомендации по практическому применению составляющих метода для отдельных операций процесса производства:

- 1) На этапе проектирования, опираясь на заданные к изделию технические условия и технические требования, разработчик производит предварительную оценку сложности ПП на основе: габаритов ПП, допустимого количества слоев, количества компонентов и их выводов, количества межсоединений и т. д. Затем разработчик определяет необходимый уровень вероятности выхода годной ПП и на основе

параметров технологических операций формирует перечень потенциальных предприятий-изготовителей, а также конструктивные параметры ПП с помощью разработанной методики (п. 5.4). Определение основных конструктивных параметров ПП предлагается осуществлять в следующем порядке:

- Расчет минимальных размеров ширины проводника и зазора между проводниками для слоев ПП в зависимости от необходимой толщины проводящего слоя, параметров операций фотолитографии и травления, класса применения изделия (п. 5.4);
- Определение номенклатуры диаметров переходных отверстий на основе характеристического отношения (допустимое отношение диаметра минимального металлизированного отверстия к толщине ПП, характеристика ТП) и их приблизительного количества;
- Расчет на основе параметров операций сверления и совмещения параметров КП: диаметра (п. 5.4) и размеров каплевидного утолщения (3.5).

- 2) На этапе конструирования разработчик создает топологию ПП. Оценка качества ПП на этапе осуществляется итеративно по мере формирования трассировки на основе величины вероятности выхода годной ПП, получаемой с помощью непосредственно метода оценки выхода годных ПП (п. 5.1–5.3). В результате разработчик передает на предприятие-изготовитель вместе с производственными файлами проекта ПП дополнительный отчет об используемых параметрах ТП и достигнутых уровнях вероятности выхода годных ПП целиком и заготовок на отдельных операциях.
- 3) На этапе подготовки производства технолог проверяет вероятность выхода годной ПП и использует ее для определения стоимости изготовления и размера производственной партии. Также технолог на основе информации о влиянии технологических операций на качество изделия осуществляет коррекцию файлов ПП для минимизации

систематической и случайной погрешности, возникающих при изготовлении ПП (п. 2.1.3).

- 4) На этапе изготовления технолог обеспечивает контроль параметров технологических операций (периодически изготавливая соответствующие тест-купоны) для передачи их на предыдущие этапы производства ПП, а также для формирования информации о влиянии технологических операций на качество изделия.

## 5.6 Выводы по главе

В главе произведено объединение результатов исследований для отдельных технологических операций:

- 1) Разработана математическая модель оценки вероятности выхода годной ПП с учетом критически значимых операций производства ПП: фотолитографии, травления, совмещения и сверления.
- 2) Разработан метод оценки выхода годных ПП, 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 ПО, обеспечивающее автоматизированный расчет вероятности выхода ПП в виде модуля, интегрированного в архитектуру ПО установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы.
- 3) 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 ПП для отдельных операций фотолитографии и травления, сверления и совмещения. Определено предельное соотношение, связывающее диаметр

КП, минимально допустимую ширину проводника и диаметр отверстия при использовании каплевидных КП. Также получено, что для текущих технологических возможностей производства использование каплевидных КП позволяет уменьшить диаметр КП в среднем на 50 мкм. Сравнение способов совмещения на основе общей матрицы перехода и на основе КЭ-сетки позволило определить эффективность последнего, обусловленную возможным уменьшением диаметра КП на 0,55 мм.

- 4) Сформированы рекомендации по практическому применению составляющих метода оценки выхода годных ПП, определяющие возможности применения метода на отдельных этапах производственного цикла электронных устройств.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены разработка и исследование нового метода априорной оценки качества печатных плат, опирающегося 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, что 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:
  - модель вероятности выхода заготовки, соответствующей требованиям приемки по критериям допустимой ширины проводника и зазора между проводниками, для операций фотолитографии и травления;
  - модели оценки вероятности выхода годной КП, для случаев нефункциональной КП и КП с подключенным проводником, описывающие процесс сверления;
  - 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:
  - 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;

- 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 ПП).
- 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

- 1) CAE — система инженерного анализа (Computer-aided engineering)
- 2) DfA — Design for Assembly
- 3) DfI — Design for Inspection
- 4) DfM — Design for Manufacturability
- 5) DfR — Design for Reliability
- 6) DfX — Design for Excellence
- 7) GRR — сходимость и воспроизводимость измерительной системы (Gage Repeatability and Reproducibility)
- 8) MSLA — технология масочной стереолитографии (Mask Stereolithography)
- 9) SPC — статистическое управление процессами (Statistical Process Control)
- 10) АОИ — автоматическая оптическая инспекция
- 11) АС — автоматизированная система
- 12) ГУ — граничные условия
- 13) ДПП — двусторонняя печатная плата
- 14) ЖК — жидкокристаллический
- 15) ЖЦИ — жизненный цикл изделия
- 16) ИТ — информационные технологии
- 17) КП — контактная площадка
- 18) КЭ — конечно-элементный
- 19) ЛЭ — логический элемент
- 20) МКЭ — метод конечных элементов
- 21) МО — математическое ожидание
- 22) МПП — многослойная печатная плата
- 23) НУ — начальные условия
- 24) ОПП — односторонняя печатная плата



- 25) ПО — программное обеспечение
- 26) ПП — печатная плата
- 27) ПУ — печатный узел
- 28) САПР — система автоматизированного проектирования
- 29) СКО — среднееквадратическое отклонение
- 30) СК — система координат
- 31) ТО — технологическая операция
- 32) ТП — технологический процесс
- 33) ТПП — технологическая подготовка производства
- 34) ТТ — технические требования
- 35) ТУ — технические условия
- 36) УФ — ультрафиолетовый
- 37) ЧПУ — числовое программное управление
- 38) ЭИ — электронное изделие
- 39) ЭКБ — электронная компонентная база

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

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>.

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.

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 -ой 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 - ой 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-ой 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-ой 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. — 2024. — 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-ей 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., Гор. Сочи, (мкр. Вишнёвка) пансионат «Буревестник» — М.: Изд-во «Артишок», — 2024. — С. 141.

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.

31. IPC-PCB Technology Trends 2023: IPC-PCB Technology Trends 2023, Bannockburn: IPC International, — 2023, — 48 p.

32. Chvanova M.S., Vasilyev F.V., Isaev V.V., Baranov V.Y. Modeling Publication Terminology Maps on Quality Assessment Problems of Printed Circuit Boards // 2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS), Yaroslavl, Russian Federation, — 2021, — pp. 267–273. Doi: 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642844.

33. Теодорович Н.Н., Кручинина С.А., Праслова Д. Г. Современные тенденции развития электроники // История и архивы. — 2016. — №1 (3).

34. ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. М: Российский институт стандартизации, — 2021. — 40 с.

35. ГОСТ 14.205–83 Обеспечение технологичности конструкции изделий. М: Стандартинформ, — 2009. — 5 с.

36. Lee N. H., Sharma P., Sung P., Chen S., Chung S. PCB engineering for improving temperature cycling reliability of lead-free solder ball joint // IEEE 24th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA). — 2017. — Pp. 1–6.

37. Медведев А. М., Можаров В. А. Плотность межсоединений электронных компонентов // Печатный монтаж (приложение к журналу «Электроника. НТБ»). — 2011. — № 3. — С. 140–145.
38. Cauwe M., Vandeveldel B., Nawghane C, Van De Slyeke M., Coulon A., Heltzel S. Challenges in introducing high-density interconnect technology in printed circuit boards for space applications // CEAS Space Journal. — Vol. 15, — 2023 — Pp. 101–112. Doi: 10.1007/s12567-021-00403-2.
39. Можаров В.А., Шуман К.В. Адаптация техпроцесса подготовки производства печатных плат высокого класса точности под заданные параметры геометрической стабильности базового материала // Труды МАИ. — 2012. — № 50. — 13 с.
40. Медведев А. Технологии межсоединений в многослойных структурах печатных плат // Технологии в электронной промышленности. — 2014. — № 6(74). — С. 38-46.
41. Birch B. Reliability testing for microvias in printed wire boards // Circuit World. — 2009. —Vol. 35. —№4. —Pp. 3–17, Nov., doi:10.1108/03056120911002361.
42. Bazaru J. Computational reliability analysis of blind micro-via with 3D and axisymmetric multi-layer PCB // Mechanical and Aerospace Engineering Theses. — 2022. — 51 p.
43. Чугунов Е.Ю., Тимошенко С.П., Погалов А.И. Разработка и исследование многокристальных микросистем на основе модульной трехмерной интеграции кристаллов. Известия вузов. Электроника. — 2024, — Т. 29, — № 1, — С. 98–107.
44. IPC–7092. Design and Assembly Process Implementation for Embedded Components, — 2015, — 148 p.
45. Buttay C., Martin C., Morel F., Caillaud R., Le Lesle J., Mrad R., Degrenne N., Mollov S. Application of the PCB-Embedding Technology in Power Electronics — State of the Art and Proposed Development. 3D-PEIM, — 2018, — 11 p.

46. Технологические возможности производства предприятия «Резонит». URL: <https://www.rezonit.ru/directory/tekhnologicheskie-osobennosti-proizvodstva/> (дата обращения: 18.12.2024).
47. Технологические возможности производства предприятия «JLCPCB». URL: <https://jlcpcb.com/capabilities/pcb-capabilities> (дата обращения: 18.12.2024).
48. Васильев Ф.В. Физическая надежность электроники // М: МАИ — 2022, — 160 с.
49. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева и др.; под общ. Ред. В.А. Шахнова. — 2-е изд., перераб. И доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. — 568 с.: ил. — (Информатика в техническом университете).
50. Михайлов В.С., Юрков Н.К. Интегральные оценки в теории надежности. Введение и основные результаты М.: Техносфера, — 2020. — 148 с.
51. Расчеты и обеспечение надежности электронной аппаратуры: учебное пособие / А.Н. Чеканов. — М.: Кнорус, — 2014. — 438 с.
52. Pecht M.G., Kang M. "Physics-of-Failure Approach to PHM," // In Prognostics and Health Management of Electronics: Fundamentals, Machine Learning, and the Internet of Things, IEEE, — 2019, — pp.61-84, doi: 10.1002/9781119515326.ch3.
53. Sadiku M., Shadare A., Dada E., Musa S. Physics of failure: an introduction // International Journal of Scientific Engineering and Applied Science. — Vol. 2. — Issue 9. — Pp. 108–111.
54. Tulkoff C., Caswell G. Design for Excellence in Electronics Manufacturing. — 2021, — 403 p. Doi: 10.1002/9781119109402.
55. Строгонов А. Оценка долговечности БИС по результатам ускоренных испытаний // Технологии в электронной промышленности. — 2007. — № 3. — С. 90–96.
56. Salmela O., Andersson K., Perttula A., Särkkä J., Tammenmaa M., Modified Engelmaier's model taking account of different stress levels // Microelectronics Reliability, — Vol. 48, — Issue 5, — 2008, — pp. 773–780.



57. Engelmaier W. Solder joints in electronics: design for reliability // Engineering, Materials Science, — 1999, — 13 p.
58. IPC-TR-579 — Study/Technical Report. Round Robin Reliability Evaluation of Small Diameter Plated Through Holes in PWBs, — 1988, — 80 p.
59. Goval D., Azimi H. R., Chong K.P., Lii M. J. Reliability of high aspect ratio plated through holes (PTH) for advanced printed circuit board (PCB) packages // 1997 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings, — 1997, — p. 129–135.
60. Сокольский А.М., Сокольский М.Л. Исследование механизмов электрохимической миграции в печатных платах авионики // Практическая силовая электроника, — 2018. — №3(71). — С. 42–44.
61. Сокольский А.М., Сокольский М.Л. О предотвращении электрохимической миграции в печатных платах авионики // Электроника: наука, технология, бизнес, — 2017. — №9 (170). — С. 116–124.
62. Oakland J.S. Statistical Process Control. Fifth Edition, — 2003, — 461 p.
63. Ефимов В.В., Барт Т.В. Статистические методы в управлении качеством продукции: учеб. пособие для вузов. — М.: КноРус, — 2013, — 172 с.
64. Р 50.1.087–2013. Статистические методы. Примеры применения. Статистическое управление процессами, М: Стандартинформ, — 2014, — 28 с.
65. Р 50.1.097–2014. Статистические методы. Примеры измерений при анализе повторяемости и воспроизводимости, М: Стандартинформ, — 2015, — 39 с.
66. ГОСТ Р 51814.3–2001. Системы качества в автомобилестроении. Методы статистического управления процессами, М: Госстандарт России, — 2001. — 36 с.
67. Иевлев В.И., Качество и надежность электронной компонентной базы ЭВМ специального назначения: учебное пособие / В.И. Иевлев, Г.А. Филиппов. — Екатеринбург: УрФУ, — 2013. — 102 с.
68. IPC–2221A. Generic Standard on Printed Board Design, — 2003, — 124 p.
69. Практическое руководство по конструированию многослойных печатных плат / Л.Н. Кечиев. М.: Грифон, — 2021. — 416с.
70. IPC-A-600G. Acceptability of Printed Boards, — 2004, — 140 p.

71. IPC–6012B. Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards. — 2007. — 56 p.
72. ГОСТ Р 53429–2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции, М: Стандартинформ, — 2018. — 11 с.
73. ГОСТ Р 55693–2013. Платы печатные жесткие. Технические требования, М: Стандартинформ, — 2014. — 60 с.
74. ГОСТ 34.601–90. Автоматизированные системы. Стадии создания, М: Стандартинформ, — 6 с.
75. Перл И.А., Каленова О.В. Введение в методологию программной инженерии: учебное пособие. — Санкт-Петербург: Университет ИТМО, — 2019. — 53 с.
76. Медведев, Печатные Платы. Конструкции и материалы. — М.: Техносфера, — 2005. — 304 с.
77. Можаров В.А. Обеспечение пространственного совмещения элементов межсоединений в многослойных печатных структурах: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.14. — М, — 2013. — 149 с.
78. Печатные платы: Справочник / Под редакцией К.Ф. Кумбза. В 2-х книгах. Книга 1. — М.: Техносфера, — 2018. — 1016 с.
79. Боброва Ю., Андроник М., Щербаков В., Китаев И. Фотолитография в технологии изготовления плат силовых модулей специального назначения // Технологии в электронной промышленности. — 2016. — № 2 — С. 31–34.
80. Exposure of Photoresists. Application Notes, URL: [https://www.microchemicals.com/dokumente/application\\_notes/exposure\\_photor resist.pdf](https://www.microchemicals.com/dokumente/application_notes/exposure_photor resist.pdf) (дата обращения: 19.12.2024).
81. Barbucha R., Kocik M., Mizeraczyk J. Laser direct imaging system for high density interconnects on PCB // Electrical Review, — 2008. — Vol. 84. — No. 3, — pp. 54–56.

82. Ванцов С., Хомутская О., Лийн Е. Влияние конструктивных параметров на плоскую деформацию печатных плат // Электроника: Наука, технология, бизнес. — 2023. — №8(229). — С.108–113.
83. Vantsov, S.V., Vasil'ev, F.V., Medvedev, A.M., Khomutskaya, O.V. Influence of Nonfunctional Contact Pads on Printed-Circuit Performance // Russian Engineering Research. — 2020. — Vol. 40, — Issue 5. — Pp. 442–445. Doi: 10.3103/S1068798X20050202.
84. Глудкин О.П., Черняев В.Н. Анализ и контроль технологических процессов производства РЭА: Учебное пособие для вузов. — М.: Радио и связь, — 1983. — 296 с.
85. Coombs C.F. Jr. Printed Circuits Handbook. Sixth Edition. New York: McGraw-Hill. — 2008. — 1633 p.
86. Transmission Step Wedges. URL: <https://www.stouffer.net/TransPage.htm> (дата обращения: 19.12.2024).
87. Ибрафиллов Х.С. Исследование методов бинаризации изображений // Вестник науки и образования. — 2017. — Т. 2. — №6 (30). — С. 43–50.
88. Шагалова П.А., Ерофеева А.Д., Орлова М.М., Чистякова Ю.С., Соколова Э. С. Исследование алгоритмов предобработки изображений для повышения эффективности распознавания медицинских снимков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. — 2020. — №1(128). — С. 25–32.
89. Казбеков А.В., Максимов Н.А. Методы сравнения контуров в задачах распознавания образов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. — 2012. — № 185. — С. 37–42.
90. Drezner Z., Turel O., Zerom D. A Modified Kolmogorov-Smirnov Test for Normality // Communications in Statistics — Simulation and Computation. — 2010. — Vol. 39. — Issue 4. — Pp. 693–704. Doi: 10.1080/03610911003615816.
91. Тихов М.С., Котельникова М.В. Современные методы статистического оценивания параметров: Учебно-методическое пособие. — Нижний Новгород, Нижегородский госуниверситет, — 2016. — 120 с.

92. Drezner Z., Turel O., Zerom D. A Modified Kolmogorov-Smirnov Test for Normality // Communications in Statistics — Simulation and Computation. — 2010. — Vol. 39. — Issue 4. — Pp. 693–704. Doi: 10.1080/03610911003615816.

93. Шкудина С. Прецизионное травление печатных плат // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. — 2011. — №7. — С. 12–18.

94. Смертина Т. Высокоточное травление. От теории к практике // Технологии в электронной промышленности. — 2008. — № 3. — С. 12–19.

95. Shirota Y. Visualization of Conjugate Distributions in Latent Dirichlet Allocation Model, URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/292915023.pdf> (дата обращения: 19.12.2024).

96. Vancov S., Khomutskaya O., A method for increasing the reliability of obtaining holes in printed circuit boards 22021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia, 16–18 November. — 2021. — Pp. 513–515.

97. Vantsov, S. & Vasil'ev, F. & Medvedev, A. & Khomutskaya, O., Quasi-Determinate Model of Thermal Phenomena in Drilling Laminates. Russian Engineering Research. — 2018. — Vol. 38. — Pp. 1074–1076.

98. Медведев А. Технологическое обеспечение надежности соединений в печатных платах // Технологии в электронной промышленности. — 2005. — № 6. — С. 48–51.

99. Теория вероятностей: учебник для втузов / Вентцель Е.С. — 4-е изд., стереотип. — М.: Наука, — 1969. — 576 с.: ил. — Библиогр.: с. 573.

100. Hilburn R., St. John P., Bevan J. Drilling of Printed Circuit Boards: An Innovative, Engineered Entry Material for Improving Accuracy of Micro and Small Diameter Drills. URL: [https://www.ipc.org/system/files/technical\\_resource/E8 %26S22\\_03.pdf](https://www.ipc.org/system/files/technical_resource/E8%26S22_03.pdf) (дата обращения: 19.12.2024).

101. Медведев А.М. Теоретические основы проектирования, контроля и испытаний электрических межсоединений в высокопроизводительных ЭВМ: Дис. ... доктора тех. наук. — 1990. — С. 88.

102. Можаров В.А. Математическая модель пространственного совмещения элементов межсоединений в многослойных структурах авионики // Электронный журнал «Труды МАИ». — 2013. — № 65. — С. 10.

103. Иевлев В.И. Анализ точности производства электронных средств: учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ–УПИ. — 2010. — 103 с.

104. Семенов П. Системы совмещения. Часть II. «Тень на плетень», или О том, как нас ведут в 5-й класс // Технологии в электронной промышленности. — 2005. — №6. — С. 10–15.

105. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Москва: Высшая школа, — 2000. — 480 с.

106. Цветков Ю.Б. Управление топологической точностью фотолитографии: Учеб. пособие по курсу «Элионные технологии». Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, — 2005. — 174 с.

107. Redwood B., Schöffner F., Garret B. The 3D-Printing Handbook: Technologies, Design and Applications, — 2017, — 289 p.

108. Шаронов А.В. Методы и алгоритмы обработки результатов экспериментальных исследований // М.: МАИ. — 2004. — 244 с.

109. Набор программных модулей pcb-tools 0.1.6. URL: <https://pypi.org/project/pcb-tools/> (дата обращения: 19.12.2024).

110. Косарев О.В., Дементьева Е.Г., Катунцов Е.В. и др. Алгоритм совмещения двумерных изображений методами контурного анализа // Вестник РГРТУ. — 2021. — № 75. — С. 24–33.

111. Глаголев В.М. Описание и программное устранение дисторсии объективов // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2017. — № 9–2.

112. Бахрушина Г.И. Моделирование геометрических атак на основе аффинных преобразований // Ученые заметки ТОГУ. — 2013. — Т. 4. — № 4. — С. 1291–1297.

113. Shehata A., Mohammad S., Abdallah M. Ragab M. A Survey on Hough Transform, Theory, Techniques and Applications // International Journal of Computer Science Issues. — 2015. — Vol. 12. — Issue 1. — № 2. — Pp. 139–156.

114. Elshakhs Y.S., Deliparaschos K.M., Charalambous T., Oliva G., Zolotas A., A Comprehensive Survey on Delaunay Triangulation: Applications, Algorithms, and Implementations Over CPUs, GPUs, and FPGAs // IEEE Access. — Vol. 12. — 24 p.

115. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. USA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., — 1989.

116. Протасов В.И., Витиска Н.И., Шустов Е.А. Решение многокритериальной задачи назначений методом генетического консилиума. Российский экономический Интернетжурнал. — 2003.

117. Протасов В.И., Потапова З.Е., Мирахмедов Р.О., Клименко В.А. Использование метода Монте-Карло и генетического программирования для получения математической модели метода эволюционного согласования решений // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2023. — №1 (29). — С. 23–32.

118. Агамиров Л.В., Агамиров В.Л., Вестяк В.А. Вычисления обратных функций распределений: алгоритмы и программы // Программные продукты и системы. — 2024. — Т. 37. — № 2. — С. 137–145. doi: 10.15827/0236-235X.142.137-145.

119. Use PCB Teardrops to Increase Yield & Design Quality, URL: <https://resources.altium.com/p/how-to-increase-design-yield-quality-with-teardrops> (дата обращения: 19.12.2024).

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

# Акты о внедрении на предприятия и использовании в учебном процессе результатов работы




АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
ЭЛЕКТРОННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ»  
ПРЕДПРИЯТИЕ КОНЦЕРНА «ВЕГА»

117587, Россия, г. Москва  
Варшавское ш., д. 125  
Тел.: +7 (495) 319-17-90  
Факс: +7 (495) 319-69-78  
E-mail: info@nicevt.ru

№ \_\_\_\_\_  
от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель генерального  
директора по научно-  
техническому развитию  
*М.В. Пантелеев*  
М.В. Пантелеев  
« 26 » \_\_\_\_\_ 2024г.



**АКТ**  
о внедрении результатов диссертационной работы  
Коробкова Максима Андреевича на тему «Разработка метода оценки выхода  
годных печатных плат по их конструктивно-технологическим параметрам»

Комиссия в составе:

|                 |                                                                                                                                            |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Председатель:   | Главный технолог – В.А. Кукарев                                                                                                            |
| Члены комиссии: | Начальник цеха печатных плат – О.О. Тронин<br>Начальник отдела разработки и изготовления<br>высокоточных управляющих систем – Н.С. Левкина |

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы  
Коробкова Максима Андреевича, а именно:

- метод оценки выхода годных печатных плат как количественный критерий  
выхода годных плат при их производстве;
- методика определения конструктивно-технологических параметров печатной  
платы, устанавливающая минимально допустимые значения параметров  
ширины проводника и зазоров между проводниками по заданным  
технологическим параметрам изготовления печатных плат;
- методика определения параметров каплевидных контактных площадок для их  
задания в САПР при проектировании печатных плат

Рисунок А.1 — Первая страница акта о внедрении результатов диссертационной  
работы в АО «НИЦЭВТ»

при использовании при проектировании и изготовлении печатных плат позволяют сократить количество итераций при разработке новых типов продукции и уменьшить суммарное время на проектирование печатных плат, удовлетворяющих требованиям приемки.

Председатель комиссии:

Члены комиссии:



В.А. Кукарев  
О.О. Тронин  
Н.С. Левкина

Рисунок А.2 — Вторая страница акта о внедрении результатов диссертационной работы в АО «НИЦЭВТ»



**УТВЕРЖДАЮ**

Генеральный директор, Генеральный конструктор  
АО «АВЭКС», к.т.н., ст.науч.сотр.

\_\_\_\_\_ М.Ф. Ганзбург

« 17 » 01 2025 г.

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы  
Коробкова Максима Андреевича на тему «Разработка метода оценки выхода  
годных печатных плат по их конструктивно-технологическим параметрам» в  
работы, проводимые в АО «АВЭКС»

Мы, нижеподписавшиеся, зам. начальника группы №02, к.т.н.  
М.Н. Слюсарев, начальник группы №03 И.А. Клычкова, инженер-технолог  
группы №03 Л.К. Тимофеева, составили настоящий акт о том, что результаты  
диссертационной работы Коробкова Максима Андреевича, а именно:

- метод оценки выхода годных печатных плат для определения степени соответствия конструктивных решений технологическим возможностям производства для проектов печатных плат высокой сложности;
- методика определения конструктивно-технологических параметров печатной платы для определения значений ширины проводника и зазора между проводниками в проекте печатной платы;
- методика определения параметров каплевидной контактной площадки сквозного металлизированного отверстия для увеличения плотности трассировки при проектировании плат

используются в рабочем процессе АО «АВЭКС» производственно-конструкторским отделом (ПКО) при проектировании печатных плат, что позволило уменьшить время разработки электронных устройств, увеличить точность оценки качества трассировки на этапе проектирования и увеличить эффективность использования трассировочного пространства.

Зам. начальника группы №02, к.т.н. \_\_\_\_\_ М.Н. Слюсарев

Начальник группы №03 \_\_\_\_\_ И.А. Клычкова

Инженер-технолог группы №03 \_\_\_\_\_ Л.К. Тимофеева

Рисунок А.3 — Акт о внедрении результатов диссертационной работы в АО «АВЭКС»

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,  
доктор технических наук, доцент



Д.А. Козорез

«20» января 2025 г.

## АКТ

об использовании результатов диссертационной работы  
Коробкова Максима Андреевича на тему «Разработка метода оценки выхода годных печатных плат по их конструктивно-технологическим параметрам» в учебном процессе МАИ

Мы, нижеподписавшиеся, директор дирекции института № 3 «Системы управления, информатика и электроэнергетика», кандидат технических наук, доцент Следков Ю.Г., заведующий кафедрой 307, кандидат технических наук, доцент Васильев Ф.В., доцент кафедры 307, кандидат технических наук, доцент Ванцов С.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Коробкова Максима Андреевича внедрены в учебный процесс на кафедре 307 «Цифровые технологии и информационные системы», а именно:

- методика определения конструктивно-технологических параметров печатной платы и методика определения параметров каплевидной контактной площадки использованы в материалах лекций по дисциплинам «Конструирование средств информационно-вычислительной техники» направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии» и «Современные технологии производства электронных средств» направления 11.04.03 «Конструирование и производство электронных средств»;
- метод оценки выхода годных печатных плат, алгоритм совмещения заготовки и шаблона по реперным знакам использованы в материалах лекций по дисциплинам «Технология производства средств информационно-вычислительной техники» направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии» и «Современные технологии производства электронных средств» направления 11.04.03 «Конструирование и производство электронных средств»;
- программное обеспечение, методики применения и прототип установки прямого экспонирования, использующей для переноса проводящего рисунка на заготовку жидкокристаллическую матрицу, использованы в лабораторной работе «Исследование процесса изготовления печатных плат» по дисциплине «Технология производства средств информационно-вычислительной техники» направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии».

Директор дирекции института № 3,  
кандидат технических наук, доцент

Ю.Г. Следков

Заведующий кафедрой 307,  
кандидат технических наук, доцент

Ф.В. Васильев

Доцент кафедры 307,  
кандидат технических наук, доцент

С.В. Ванцов

Рисунок А.5 — Акт об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе МАИ

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Свидетельства о публикации объектов интеллектуальной собственности



Рисунок Б.1 — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021612973 от 26.02.2021: Коробков М.А., Хомутская О.В., Поздняков К.Е. Программное обеспечение для анализа деформации слоя многослойной печатной платы





Рисунок Б.2 — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023664424 от 04.07.2023: 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



Рисунок Б.3 — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025611043 от 16.01.2025: Степанов А.С., Лавриненко С.А., Коробков М.А. Программа для анализа деформаций слоев многослойных печатных плат





Рисунок Б.4 — Патент на изобретение № 2835108 от 21.02.2025: Коробков М.А., Хомутская О.В., Зайкин В.Д. Установка прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Листинг программы компьютерной обработки изображений для определения параметров операции фотолитографии

Программное обеспечение реализовано на языке программирования Python (версия интерпретатора: 3.11).

```
import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import re
import locale
import math
import csv
import scipy.stats as sps
from statistics import NormalDist
from scipy.stats import shapiro
import statsmodels.api as sm
from scipy.stats import normaltest

locale.setlocale(locale.LC_NUMERIC, 'ru_RU.UTF-8')
locale.localeconv()['decimal_point'] = ','
plt.rcParams['axes.formatter.use_locale'] = True

green_color = [0, 255, 0]
yellow_color = [0, 255, 255]
red_color = [0, 0, 255]
white_color = [255, 255, 255]

inch_to_mm = 25.4
inch_to_um = 25400

def chi_square_norm(data, bins, mean, std):
    sorted_data = sorted(data)
    min = sorted_data[0]
    max = sorted_data[-1]
    begin = 0
    current_freq = 0
    intervals = []
    freqs = []
    probs = []
    data_size = len(sorted_data)
    for i in range(0, bins - 1):
        low_limit = min + (max-min)/bins*(i)
        high_limit = min + (max-min)/bins*(i+1)
        intervals.append((low_limit+high_limit)/2)
        if i == 0:
            probs.append(sps.norm.cdf(high_limit, loc=mean,
scale=std)-sps.norm.cdf(low_limit - 1000000, loc=mean, scale=std))
        else:
            probs.append(sps.norm.cdf(high_limit, loc=mean,
scale=std)-sps.norm.cdf(low_limit, loc=mean, scale=std))
        current_freq = 0
        for num in range(begin, data_size):
            if sorted_data[num] < high_limit:
                current_freq += 1
```

```

        else:

            begin = num
            freqs.append(current_freq)
            break
        freqs.append(data_size-sum(freqs))
        probs.append(sps.norm.cdf(max + 1000000, loc=mean,
scale=std)-sps.norm.cdf(max - (max-min)/bins, loc=mean, scale=std))
        chi_square = 0
        for i in range(0, bins):
            chi_square = chi_square + ((freqs[i] - data_size *
probs[i])**2)/(data_size * probs[i])
        print(f"chi_square: <{sps.chisquare(f_obs=probs, f_exp=freqs,
ddof=2).pvalue}>")

def mu_norm(data, bins, mean, std):
    sorted_data = sorted(data)
    min = sorted_data[0]
    max = sorted_data[-1]
    begin = 0
    current_freq = 0
    intervals = []
    freqs = []
    probs = []
    data_size = len(sorted_data)
    for i in range(0, bins - 1):
        low_limit = min + (max-min)/bins*(i)
        high_limit = min + (max-min)/bins*(i+1)
        intervals.append((low_limit+high_limit)/2)
        if i == 0:
            probs.append(sps.norm.cdf(high_limit, loc=mean,
scale=std)-sps.norm.cdf(low_limit - 1000000, loc=mean, scale=std))
        else:
            probs.append(sps.norm.cdf(high_limit, loc=mean,
scale=std)-sps.norm.cdf(low_limit, loc=mean, scale=std))
        current_freq = 0
        for num in range(begin, data_size):
            if sorted_data[num] < high_limit:
                current_freq += 1
            else:

                begin = num
                freqs.append(current_freq)
                break
        freqs.append(data_size-sum(freqs))
        probs.append(sps.norm.cdf(max + 1000000, loc=mean,
scale=std)-sps.norm.cdf(max - (max-min)/bins, loc=mean, scale=std))
    return m_u.pvalue

class Object:
    def __init__(self, photo_path, format = True):
        """
        Этот метод инициализирует объект класса с заданным путем к фотографии. Он
загружает изображение,
устанавливает пороговое значение, создает две копии изображения (бинарное
и обработанное),
а также определяет ширину целевого объекта на основе названия файла, если
это возможно.
Args:
photo_path (str): путь к фотографии
format (bool): True - экспонированное фото, False - фотошаблоны
        """
        self.sample_name = None
        self.sample_version = None

```



```

self.sample_number = None
self.sample_type = None
self.dpi = None
self.conductor_direction = None
self.width_target = None
self.format = None

self.photo_path = photo_path
self.thresh = 127
self.image_original = cv2.imread(photo_path)
self.image_original = cv2.GaussianBlur(self.image_original, (9,9), 0)
self.binary_image = self.image_original
self.processed_image = self.binary_image

input_string = photo_path.split("/")[-1].split(".")[0].split("_")
try:
    self.sample_name = input_string[0]
    self.sample_version = int(input_string[1])
    self.sample_number = int(input_string[2])
    self.sample_type = input_string[3]
    if self.sample_type == 'pm':
        self.format = False
    else:
        self.format = True
    self.dpi = int(input_string[4])
    self.conductor_direction = input_string[5]
    self.width_target = int(input_string[6])
except:
    print(f'Error in filename. Resulted input: <{input_string}>')
    exit()

def binary_image_proceed(self, write):
    """
    Эта функция преобразует исходное изображение в двоичное изображение с
    помощью алгоритма пороговой обработки Оцу.
    После преобразования изображение сохраняется как обработанное двоичное
    изображение.
    Если параметр write равен True, то исходное изображение и двоичное
    изображение сохраняются как файлы .jpg в папке processed_images.
    Args:
    self: ссылка на экземпляр класса
    write (bool): флаг для записи изображений в файл, True - записать,
    False - нет
    """
    gray = cv2.cvtColor(self.image_original, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    hist = cv2.calcHist([gray], [0], None, [256], [0, 256])
    hist_norm = hist.ravel() / hist.sum()
    max_variance, best_threshold = 0,
    for threshold in range(256):
        w_background = hist_norm[:threshold].sum()
        w_foreground = hist_norm[threshold:].sum()
        mean_background = np.arange(threshold).dot(hist_norm[:threshold]) /
w_background if w_background > 0 else 0
        mean_foreground = np.arange(threshold, 256).dot(
            hist_norm[threshold:]) / w_foreground if w_foreground > 0 else 0

        inter_class_variance = w_background * w_foreground *
((mean_background - mean_foreground) ** 2)

        if inter_class_variance > max_variance:
            max_variance = inter_class_variance
            best_threshold = threshold

```

```

_, self.binary_image = cv2.threshold(gray, best_threshold, 255,
cv2.THRESH_BINARY)
self.binary_image = cv2.cvtColor(self.binary_image, cv2.COLOR_GRAY2BGR)
self.processed_image = self.binary_image
if write:
    cv2.imwrite('../processed_images/original_image.tif',
self.image_original)
    cv2.imwrite('../processed_images/binary_image.tif', self.binary_image)
def dilate_image(self, kernel_scale, write):
    """
    Эта функция выполняет дилатацию
    Args:
    self: ссылка на экземпляр класса
    kernel_scale(int): размер ядра для дилатации
    write(bool): флаг для записи изображения в файл
    """
    self.processed_image = cv2.dilate(self.processed_image,
np.ones((kernel_scale, kernel_scale), np.uint8))
    if write:
        cv2.imwrite('../processed_images/processed_image.tif',
self.processed_image)

    def erode_image(self, kernel_scale, write):
        """
        Эта функция выполняет эрозию
        Args:
        kernel_scale (int): размер ядра для эрозии
        write (bool): флаг для записи обработанного изображения
        """
        self.processed_image = cv2.erode(self.processed_image,
np.ones((kernel_scale, kernel_scale), np.uint8))
        if write:
            cv2.imwrite('../processed_images/processed_image.tif',
self.processed_image)

    def morph_open_image(self, kernel_scale, write):
        """
        Выполняет операцию морфологического открытия на обработанном изображении.
        Args:
        kernel_scale(int): размер ядра для операции
        write(bool): флаг для записи изображения после обработки
        """
        self.processed_image = cv2.morphologyEx(self.processed_image,
cv2.MORPH_OPEN,
np.ones((kernel_scale,
kernel_scale), np.uint8))
        if write:
            cv2.imwrite('../processed_images/processed_image.tif',
self.processed_image)

    def morph_close_image(self, kernel_scale, write):
        """
        Выполняет операцию морфологического закрытия
        Args:
        kernel_scale(int): размер ядра для операции
        write(bool): флаг для записи изображения после обработки
        """
        self.processed_image = cv2.morphologyEx(self.processed_image,
cv2.MORPH_CLOSE,
np.ones((kernel_scale,
kernel_scale), np.uint8))
        if write:
            cv2.imwrite('../processed_images/processed_image.tif',
self.processed_image)

```

```

def median_blur_image(self, kernel_scale, write):
    """
    Выполняет медианный размытый фильтр
    Args:
    kernel_scale(int): размер ядра для фильтрации
    write(bool): флаг для записи изображения после обработки
    """
    self.processed_image = cv2.medianBlur(self.processed_image, kernel_scale)
    if write:
        cv2.imwrite('../processed_images/processed_image.tif',
self.processed_image)

def dilate_erode_open_close_median_image(self, kernel_scale, write = True):
    """
    Функция dilate_erode_open_close_median_image последовательно применяет
операции дилатации, эрозии,
морфологического открытия и закрытия, а также медианного размытия к
обработанному изображению.
    Args:
    kernel_scale(int): размер ядра для операций
    write(bool): флаг для записи изображения после каждой операции
    Returns:
    None
    """
    self.binary_image_proceed(write)
    self.dilate_image(kernel_scale, write)
    self.erode_image(kernel_scale, write)
    self.morph_open_image(kernel_scale, write)
    self.morph_close_image(kernel_scale, write)
    self.median_blur_image(kernel_scale, write)

class Handler:
    def __init__(self, object):
        """
        Инициализация объекта и его свойств.
        Args:
        object: Объект, который будет инициализирован
        Attributes:
        self.object: Объект, который инициализируется
        self.image_lpx: Массив пикселей обработанного изображения, в формате 1 x
width, где width - ширина изображения
        self.image_lpx_original: Массив пикселей оригинального
изображения (используется для поиска градиента роста яркости)
        self.contours_lpx: Массив всех контуров, найденных на изображении 1 x
width
        self.widths_lpx: Массив ширин всех контуров, найденных на изображении 1 x
width
        self.colors_lpx: Массив цветов этих контуров
        """
        super().__init__()
        self.object = object
        self.image_lpx = 0
        self.image_lpx_original = 0
        self.contours_lpx = []
        self.widths_lpx = []
        self.filtered_widths_lpx = []
        self.colors_lpx = []

        self.image_handler_kernel_size = 3
        self.edge_th_pix = 10
        self.left_edge_reflection_size = 0
        self.right_edge_reflection_size = 0
        self.class_treshold_3 = [0.8, 1.2]

```

```

self.class_treshold_2 = [0.7, 1.3]
if (self.object.width_target > 200):
    self.max_treshold = [0.1, 2]
else:
    self.max_treshold = [0.1, 2]
self.hist_cut_data_size = 0.01
self.show_countur_thickness = 2
self.show_image_size = 100000
self.show_image_format = cv2.WINDOW_AUTOSIZE
self.show_image_type = 'result'

def get_width_and_contours_lpx(self):
    """
    Функция get_width_and_contours_lpx вычисляет ширину и контуры для одного
    пикселя изображения.
    Она преобразует изображение в оттенки серого, находит контуры объектов и
    определяет их ширину. Затем функция фильтрует контуры на основе их
    ширины (средней и максимальной),
    чтобы оставить только те, которые соответствуют определенным условиям.
    Такой отсев используется для всего того, что не является проводниками (например
    черные точки и т. д.)
    Args:
    self: объект, к которому применяется функция
    Returns:
    list: список отфильтрованных ширин
    list: список отфильтрованных контуров
    """
    gray = cv2.cvtColor(self.image_lpx, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    inverted_gray = cv2.bitwise_not(gray) if self.object.format else gray
    contours, _ = cv2.findContours(inverted_gray, cv2.RETR_EXTERNAL,
    cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
    if len(contours) == 0:
        return [], []
    widths = []
    filtered_contours = []
    for contour in contours:
        if len(contour) == 2:
            if contour[1][0][0] + self.right_edge_reflection_size <
self.object.processed_image.shape[1]-1:
                contour[1][0][0] += self.right_edge_reflection_size *
self.object.format
            if contour[0][0][0] - self.left_edge_reflection_size >= 0 :
                contour[0][0][0] -= self.left_edge_reflection_size *
self.object.format
            width = round((contour[1][0][0] - contour[0][0][0]) * (inch_to_um
/ self.object.dpi)) # dpi
            widths.append(width)
            filtered_contours.append(contour)
    try:
        if (filtered_contours[-1][0][0][0] < self.edge_th_pix): #
counturs[-1][0][0][0] - координата X левой точки левого проводника
            filtered_contours = filtered_contours[:-1]
            widths = widths[:-1]
        if (filtered_contours[0][1][0][0] >
self.object.processed_image.shape[1]-self.edge_th_pix-1):
            #counturs[0][1][0][0] - координата X правой точки правого проводника
            filtered_contours = filtered_contours[1:]
            widths = widths[1:]
    except:
        pass
    return widths, filtered_contours

def get_colors_lpx(self):
    """

```

```

Определяет цвет контура на основе ширины.
Args:
self: ссылка на экземпляр класса
Returns:
list: список цветовых значений для каждой ширины контуров
"""
flags = []
for i in self.widths_1px:
    if (i >= (self.object.width_target * self.class_treshold_3[0])) and (i
<= (self.object.width_target * self.class_treshold_3[1])):
        flags.append(green_color)
        self.filtered_widths_1px.append(i)
    elif (i >= (self.object.width_target * self.class_treshold_2[0])) and
(i <= (self.object.width_target * self.class_treshold_2[1])):
        flags.append(yellow_color)
        self.filtered_widths_1px.append(i)
    elif i >= (self.object.width_target * self.max_treshold[0]) and (i <=
(self.object.width_target * self.max_treshold[1])):
        flags.append(red_color)
        self.filtered_widths_1px.append(i)
    else:
        flags.append(white_color)
return flags

def get_all_contours_with_color(self):
    """
    Этот метод выполняет обработку изображения и извлечение контуров с
    цветами.
    Извлечение контуров с цветами означает выделение границ
    объектов на изображении и определение цвета каждого контура.
    Args:
    self: ссылка на текущий объект класса
    Returns:
    dict_of_height_and_contours (dict): Словарь, где ключи - высоты, а
    значения - контуры с добавленными значениями ключей для каждого массива
    flags (list): Список флагов, представляющих цвета всех контуров для каждой
    высоты
    """
    self.object.dilate_erode_open_close_median_image(self.image_hanlder_kernel
_size)

    widths = []
    flags = []
    contours = {}
    for i in range(1, len(self.object.processed_image) + 1):
        self.image_1px_original = self.object.image_original[i - 1:i]
        self.image_1px = self.object.processed_image[i - 1:i]
        self.widths_1px, self.contours_1px = self.get_width_and_contours_1px()
        flags.append(self.get_colors_1px())
        contours[i - 1] = self.contours_1px
        for j in self.widths_1px:
            widths.append(j)
    dict_of_height_and_contours = {key: [array + (array == 0) * key for array
in arrays]
                                for key, arrays in contours.items()}
    return dict_of_height_and_contours, flags

def get_widths(self):
    """
    Возвращает массив ширин проводников
    Args:
    self: ссылка на текущий объект
    Returns:
    list: список ширин контуров

```

```

"""
self.object.dilate_erode_open_close_median_image(self.image_handler_kernel
_size, False)
widths = []
flags = []
contours = {}
for i in range(1, len(self.object.processed_image) + 1):
    self.image_lpx_original = self.object.image_original[i - 1:i]
    self.image_lpx = self.object.processed_image[i - 1:i]
    self.widths_lpx, self.contours_lpx = self.get_width_and_contours_lpx()

    contours[i - 1] = self.contours_lpx
    for j in self.widths_lpx:
        widths.append(j)
return widths

def make_contours_image(self):
    """
    Функция make_contours_image() создает изображение с заполненными
    контурами,
    используя цвета, полученные из функции get_all_contours_with_color().
    Для каждого контура и его цвета функция заполняет контур на изображении
    filled_contours
    с помощью функции cv2.fillPoly(). В конце функция возвращает изображение с
    заполненными контурами.
    Args:
    self: ссылка на текущий объект
    Returns:
    numpy.ndarray: изображение с заполненными контурами
    """
    contours, colors = self.get_all_contours_with_color()
    filled_contours = np.zeros_like(self.object.processed_image)

    for key, flag in zip(contours, colors):
        for i, data in enumerate(contours[key]):
            if self.show_countur_thickness > 0:
                cv2.drawContours(filled_contours, data, -1, flag[i],
thickness = self.show_countur_thickness)
            else:
                cv2.drawContours(filled_contours, [data], -1, flag[i],
thickness=1)
    return filled_contours

class Interface(Handler):
    def proceed_image(self):
        """
        Функция proceed_image() отображает и сохраняет несколько изображений на
        экране,
        включая оригинальное изображение, бинарное изображение, обработанное
        изображение и результат,
        полученный путем добавления контуров к оригинальному изображению. Затем
        результат сохраняется как файл
        'Resulted_image.jpg'. Функция использует окна с различными размерами
        для отображения изображений с помощью библиотеки OpenCV.
        Args:
        self: ссылка на текущий объект
        """
        result = cv2.addWeighted(self.object.image_original, 1,
self.make_contours_image(), 1, 0)
        cv2.imwrite('Resulted_image.tif', result)
        cv2.waitKey(0)
        cv2.destroyAllWindows()

    def get_histogram(self):

```

```

"""
Функция get_histogram() строит гистограмму распределения ширины объектов
на изображении.
Она вычисляет ширину объектов, сортирует полученные значения,
определяет количество значений для удаления (6 % от общего числа),
а затем анализирует асимметрию распределения (скос) с помощью функции
skew().
В зависимости от знака скоса, функция корректирует данные и строит
гистограмму
с учетом этой информации. Если скос равен 0, то просто строится
гистограмма без изменений.
о завершении выводится гистограмма с подписями осей.
Args:
self: ссылка на текущий объект
Returns:
None
"""
widths = self.filtered_widths_lpx
widths = widths[int(len(widths) * 0.001):-int(len(widths) * 0.001)]
print(len(widths))
sorted_array = sorted(widths)
num_to_remove = int(len(widths) * self.hist_cut_data_size)
widths = sorted_array[num_to_remove:-num_to_remove]
mean = np.mean(widths)
mode = sps.mode(widths)[0]
median = np.median(widths)
std = np.std(widths)
cnt_OK_3 = 0
cnt_OK_2 = 0
global shapiro1
global shapiro5
global mu1
global mu5
global ks1
global ks5
global d1
global d5
global cnt
for width in widths:
    if (width >= (self.object.width_target * self.class_treshold_3[0]))
and (width <= (self.object.width_target * self.class_treshold_3[1])):
        cnt_OK_3 += 1
    if (width >= (self.object.width_target * self.class_treshold_2[0]))
and (width <= (self.object.width_target * self.class_treshold_2[1])):
        cnt_OK_2 += 1
try:
    cnt_OK_3 = cnt_OK_3 / len(widths)
    cnt_OK_2 = cnt_OK_2 / len(widths)
except:
    cnt_OK_3 = 0
    cnt_OK_2 = 0
P_OK_3 = NormalDist(mu=mean, sigma=std).cdf(self.object.width_target *
self.class_treshold_3[1]) - NormalDist(mu=mean,
sigma=std).cdf(self.object.width_target * self.class_treshold_3[0])
P_OK_2 = NormalDist(mu=mean, sigma=std).cdf(self.object.width_target *
self.class_treshold_2[1]) - NormalDist(mu=mean,
sigma=std).cdf(self.object.width_target * self.class_treshold_2[0])
mean_dif = mean-self.object.width_target
wnp = np.array(widths)
plt.hist(widths, bins=15, density=True, alpha=0.75, color='skyblue',
edgecolor='black')
shapiro_p = shapiro(wnp).pvalue
d_p = sps.normaltest(wnp).pvalue
ks_p = sps.kstest(wnp, 'norm', args=(wnp.mean(), wnp.std())).pvalue

```





```

        format_result = [sample_name + '_' + sample_version, num, dir,
result['width'], result['mean'], result['mean_dif'], result['median'],
result['mode'],
                        result['std'], result['cnt_OK_3'],
result['cnt_OK_2'], result['P_OK_3'], result['P_OK_2']]
        print(format_result)
        writer.writerow(format_result)
        print(f"Shapiro stats: 5 %: <{round(shapiro5/cnt*100, 0)}>; 1 %:
<{round(shapiro1/cnt*100, 0)}>")
        print(f"D'Agostino stats: 5 %: <{round(d5/cnt*100, 0)}>; 1 %:
<{round(d1/cnt*100, 0)}>")
        print(f"Kolmogorov-Smirnov stats: 5 %: <{round(ks5/cnt*100, 0)}>; 1 %:
<{round(ks1/cnt*100, 0)}>")
        print(f"Mann-Whitney stats: 5 %: <{round(mu5/cnt*100, 0)}>; 1 %:
<{round(mu1/cnt*100, 0)}>")

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Уравнение кривой, ограничивающей область допустимого смещения центра отверстия относительно центра контактной площадки

Для определения вида кривой, ограничивающей допустимое смещение центра отверстия относительно центра контактной площадки в области соединения проводника и контактной площадки, для случая равенства ширины проводника минимально возможной необходимо решить систему уравнений (Г1):

$$\begin{cases} y = y_1 - \sqrt{(\delta + R_{drill})^2 - (x + x_1)^2} \\ y = y_1 - \sqrt{(w_{tr\_d} - \delta + R_{drill})^2 - (x - x_1)^2} \end{cases}, \quad (Г1)$$

$$\delta_{min} \leq \delta \leq w_{tr\_d} - \delta_{min}.$$

Оба уравнения выражены относительно  $y$ . Приравняем их правые части друг другу, возведем в квадрат и сделаем подстановку  $x_1 = 0,5w_{tr\_d}$  (Г2):

$$\begin{aligned} & (\delta + R_{drill})^2 - (x + 0,5w_{tr\_d})^2 = \\ & = (w_{tr\_d} - \delta + R_{drill})^2 - (x - 0,5w_{tr\_d})^2. \end{aligned} \quad (Г2)$$

Разделим слагаемые с переменной  $x$  и без нее (Г3):

$$\begin{aligned} & (w_{tr\_d} - \delta + R_{drill})^2 - (\delta + R_{drill})^2 = \\ & = (x - 0,5w_{tr\_d})^2 - (x + 0,5w_{tr\_d})^2. \end{aligned} \quad (Г3)$$

Раскроем разности квадратов в обеих частях уравнения (Г3) и выразим функцию  $x(\delta)$  (Г4):

$$\begin{aligned} & (w_{tr\_d} - \delta + R_{drill} + \delta + R_{drill})(w_{tr\_d} - \delta + R_{drill} - \delta - R_{drill}) = \\ & = (x - 0,5w_{tr\_d} + x + 0,5w_{tr\_d})(x - 0,5w_{tr\_d} - x - 0,5w_{tr\_d}); \end{aligned}$$

$$(w_{tr\_d} + 2R_{drill})(w_{tr\_d} - 2\delta) = -2xw_{tr\_d};$$

$$\frac{w_{tr\_d}(w_{tr\_d} + 2R_{drill})}{-2w_{tr\_d}} - \frac{2\delta(w_{tr\_d} + 2R_{drill})}{-2w_{tr\_d}} = x;$$

$$x(\delta) = \frac{(w_{tr\_d} + 2R_{drill})}{w_{tr\_d}} \delta - \frac{w_{tr\_d} + 2R_{drill}}{2}. \quad (\Gamma 4)$$

Найдем область определения функции (Г4) в виде неравенства (Г5) на основе исходных требований (Г1):

$$-\frac{w_{tr\_d} + 2R_{drill}}{2} \leq x \leq \frac{w_{tr\_d} + 2R_{drill}}{2}. \quad (\Gamma 5)$$

Подставим полученную функцию  $x(\delta)$  (Г4) в одно из исходных уравнений (Г1) и получим выражение (Г6):

$$y = y_1 - \sqrt{(\delta + R_{drill})^2 - \left(x(\delta) + \frac{w_{tr\_d}}{2}\right)^2}. \quad (\Gamma 6)$$

Рассмотрим отдельно подкоренную составляющую выражения (Г6) для ее упрощения (Г7):

$$\begin{aligned} & (\delta + R_{drill})^2 - \left(x(\delta) + \frac{w_{tr\_d}}{2}\right)^2 = \\ &= \left(\delta + R_{drill} + x(\delta) + \frac{w_{tr\_d}}{2}\right) \left(\delta + R_{drill} - x(\delta) - \frac{w_{tr\_d}}{2}\right) = \\ &= \left|x(\delta) = \frac{(w_{tr\_d} + 2R_{drill})}{w_{tr\_d}} \delta - \frac{w_{tr\_d} + 2R_{drill}}{2}\right| = \\ &= \left(\delta + R_{drill} + \frac{(w_{tr\_d} + 2R_{drill})}{w_{tr\_d}} \delta - \frac{w_{tr\_d} + 2R_{drill}}{2} + \frac{w_{tr\_d}}{2}\right) * \\ &* \left(\delta + R_{drill} - \frac{(w_{tr\_d} + 2R_{drill})}{w_{tr\_d}} \delta + \frac{w_{tr\_d} + 2R_{drill}}{2} - \frac{w_{tr\_d}}{2}\right) = \\ &= \left(\delta + R_{drill} + \delta + \frac{2R_{drill}}{w_{tr\_d}} \delta - \frac{w_{tr\_d}}{2} - R_{drill} + \frac{w_{tr\_d}}{2}\right) * \\ &* \left(\delta + R_{drill} - \delta - \frac{2R_{drill}}{w_{tr\_d}} \delta + \frac{w_{tr\_d}}{2} + R_{drill} - \frac{w_{tr\_d}}{2}\right) = \\ &= \left(2\delta + \frac{2R_{drill}}{w_{tr\_d}} \delta\right) \left(2R_{drill} - \frac{2R_{drill}}{w_{tr\_d}} \delta\right) = 4R_{drill} \delta \left(1 + \frac{R_{drill}}{w_{tr\_d}}\right) \left(1 - \frac{\delta}{w_{tr\_d}}\right). \end{aligned}$$

Тогда:

$$(\delta + R_{drill})^2 - \left(x(\delta) + \frac{w_{tr\_d}}{2}\right)^2 = 4R_{drill}\delta \left(1 + \frac{R_{drill}}{w_{tr\_d}}\right) \left(1 - \frac{\delta}{w_{tr\_d}}\right). \quad (\Gamma 7)$$

Таким образом, можно вывести решение системы (Г1) в параметрическом виде (Г8):

$$\begin{cases} x(\delta) = \frac{(w_{tr\_d} + 2R_{drill})}{w_{tr\_d}}\delta - \frac{w_{tr\_d} + 2R_{drill}}{2} \\ y(\delta) = y_1 - 2\sqrt{R_{drill}\delta \left(1 + \frac{R_{drill}}{w_{tr\_d}}\right) \left(1 - \frac{\delta}{w_{tr\_d}}\right)}, \quad 0 \leq \delta \leq w_{tr\_d}. \end{cases} \quad (\Gamma 8)$$

Из уравнения (Г4) найдем зависимость  $\delta(x)$  (В9):

$$\delta(x) = \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}}x + \frac{w_{tr\_d}}{2}. \quad (\text{В9})$$

Подставим (В9) в одно из уравнений системы (Г1):

$$y = y_1 - \sqrt{(\delta(x) + R_{drill})^2 - \left(x + \frac{w_{tr\_d}}{2}\right)^2}. \quad (\Gamma 10)$$

Рассмотрим отдельно подкоренное выражение (Г10) для его упрощения (Г11):

$$\begin{aligned} & (\delta(x) + R_{drill})^2 - \left(x + \frac{w_{tr\_d}}{2}\right)^2 = \\ & = \left(\delta(x) + R_{drill} + x + \frac{w_{tr\_d}}{2}\right) \left(\delta(x) + R_{drill} - x - \frac{w_{tr\_d}}{2}\right) = \\ & = \left| \delta(x) = \frac{w_{tr\_d}x}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} + \frac{w_{tr\_d}}{2} \right| = \\ & = \left( \frac{w_{tr\_d}x}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} + \frac{w_{tr\_d}}{2} + R_{drill} + x + \frac{w_{tr\_d}}{2} \right) * \\ & * \left( \frac{w_{tr\_d}x}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} + \frac{w_{tr\_d}}{2} + R_{drill} - x - \frac{w_{tr\_d}}{2} \right) = \\ & = \left( \frac{w_{tr\_d}x}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} + w_{tr\_d} + R_{drill} + x \right) \left( \frac{w_{tr\_d}x}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} + R_{drill} - x \right) = \\ & = \left( \left( \frac{w_{tr\_d}x}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} \right)^2 + \frac{R_{drill}w_{tr\_d}x}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} - \frac{w_{tr\_d}x^2}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} \right) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left( \frac{w_{tr\_d}^2 x}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} + w_{tr\_d} R_{drill} - w_{tr\_d} x \right) + \\
& + \left( \frac{R_{drill} w_{tr\_d} x}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} + R_{drill}^2 - R_{drill} x \right) + \left( \frac{w_{tr\_d} x^2}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} + R_{drill} x - x^2 \right) = \\
& = x^2 \left[ \left( \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} \right)^2 - 1 \right] + x \left[ \frac{2R_{drill} w_{tr\_d}}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} + \frac{w_{tr\_d}^2}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} - w_{tr\_d} \right] + \\
& + [w_{tr\_d} R_{drill} + R_{drill}^2].
\end{aligned}$$

Тогда:

$$\begin{aligned}
& (\delta(x) + R_{drill})^2 - \left( x + \frac{w_{tr\_d}}{2} \right)^2 = x^2 \left[ \left( \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} \right)^2 - 1 \right] + \\
& + x \left[ \frac{2R_{drill} w_{tr\_d}}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} + \frac{w_{tr\_d}^2}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} - w_{tr\_d} \right] + [w_{tr\_d} R_{drill} + R_{drill}^2].
\end{aligned} \tag{Г11}$$

Коэффициент при  $x$  в выражении (Г11) равен нулю:

$$\begin{aligned}
& \frac{2R_{drill} w_{tr\_d}}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} + \frac{w_{tr\_d}^2}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} - w_{tr\_d} = \\
& = \frac{2R_{drill} w_{tr\_d} + w_{tr\_d}^2 - w_{tr\_d}^2 - 2R_{drill} w_{tr\_d}}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} = 0.
\end{aligned}$$

Тогда уравнение (Г10) примет вид (Г12):

$$y = y_1 - \sqrt{x^2 \left[ \left( \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} \right)^2 - 1 \right] + [w_{tr\_d} R_{drill} + R_{drill}^2]}. \tag{Г12}$$

Проведем следующие преобразования выражения (Г12) к виду (Г13):

$$\begin{aligned}
& x^2 \left[ 1 - \left( \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d} + 2R_{drill}} \right)^2 \right] + (y - y_1)^2 = w_{tr\_d} R_{drill} + R_{drill}^2; \\
& x^2 \left[ \frac{w_{tr\_d}^2 + 4w_{tr\_d} R_{drill} + 4R_{drill}^2 - w_{tr\_d}^2}{(w_{tr\_d} + 2R_{drill})^2 (w_{tr\_d} R_{drill} + R_{drill}^2)} \right] + \frac{(y - y_1)^2}{w_{tr\_d} R_{drill} + R_{drill}^2} = 1; \\
& \frac{x^2}{\left[ \frac{(w_{tr\_d} + 2R_{drill})^2 (w_{tr\_d} R_{drill} + R_{drill}^2)}{4(w_{tr\_d} R_{drill} + R_{drill}^2)} \right]} + \frac{(y - y_1)^2}{w_{tr\_d} R_{drill} + R_{drill}^2} = 1;
\end{aligned}$$

$$\frac{x^2}{(0,5w_{tr\_d} + R_{drill})^2} + \frac{(y - y_1)^2}{(\sqrt{R_{drill}(R_{drill} + w_{tr\_d})})^2} = 1. \quad (\Gamma 13)$$

Таким образом, решение системы (Г1) принадлежит уравнению эллипса (Г13), которое можно представить в виде (Г14):

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a_{tr\_d}^2} + \frac{(y - y_1)^2}{b_{tr\_d}^2} = 1; \\ a_{tr\_d} = 0,5w_{tr\_d} + R_{drill}; \\ b_{tr\_d} = \sqrt{R_{drill}(R_{drill} + w_{tr\_d})}. \end{cases} \quad (\Gamma 14)$$

Полученное решение (Г14) также имеет дополнительное ограничение: решению исходной системы уравнений (Г1) соответствует только нижняя половина эллипса. Верхняя половина эллипса — дополнительное решение, полученное вынужденно при возведении исходного уравнения системы (Г1) в квадрат.

Для определения вида кривой, ограничивающей допустимое смещение центра отверстия относительно центра контактной площадки в области соединения проводника и контактной площадки, для случая неравенства ширины проводника минимально допустимой необходимо решить систему уравнений (Г15):

$$\begin{cases} y = y_1 - \sqrt{(\delta + R_{drill})^2 - (x + x_1)^2} \\ y = y_1 - \sqrt{(w_{tr\_d\_min} - \delta + R_{drill})^2 - (x - x_1)^2}, \end{cases} \quad (\Gamma 15)$$

$$\delta_{min} \leq \delta \leq w_{tr\_d\_min} - \delta_{min}.$$

Оба уравнения выражены относительно  $y$ . Приравняем их правые части друг другу, возведем в квадрат и сделаем подстановку  $x_1 = 0,5w_{tr\_d}$ :

$$(\delta + R_{drill})^2 - (x + 0,5w_{tr\_d})^2 = (w_{tr\_d\_min} - \delta + R_{drill})^2 - (x - 0,5w_{tr\_d})^2.$$

Разделим слагаемые с переменной  $x$  и без нее:

$$(w_{tr\_d\_min} - \delta + R_{drill})^2 - (\delta + R_{drill})^2 = (x - 0,5w_{tr\_d})^2 - (x + 0,5w_{tr\_d})^2.$$

Раскроем разности квадратов в обеих частях уравнения и выразим функцию  $\delta(x)$  (Г16):

$$(w_{tr\_d\_min} - \delta + R_{drill} + \delta + R_{drill})(w_{tr\_d\_min} - \delta + R_{drill} - \delta - R_{drill}) =$$

$$= (x - 0,5w_{tr\_d} + x + 0,5w_{tr\_d})(x - 0,5w_{tr\_d} - x - 0,5w_{tr\_d}).$$

Или:

$$(w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill})(w_{tr\_d\_min} - 2\delta) = -2xw_{tr\_d}.$$

$$\delta(x) = \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}}x + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2}. \quad (\Gamma 16)$$

Выразим из (Г16) функцию  $x(\delta)$  (Г17) и найдем область определения функции (Г18):

$$x(\delta) = \frac{(w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill})(-w_{tr\_d\_min} + 2\delta)}{2w_{tr\_d}} =$$

$$= \frac{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}}{w_{tr\_d}}\delta - \frac{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}}{2w_{tr\_d}}w_{tr\_d\_min}; \quad (\Gamma 17)$$

$$-\frac{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}}{2w_{tr\_d}}w_{tr\_d\_min} \leq x \leq \frac{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}}{2w_{tr\_d}}w_{tr\_d\_min}. \quad (\Gamma 18)$$

Подставим полученную функцию  $\delta(x)$  (Г17) в одно из исходных уравнений (Г18) и получим выражение (Г19):

$$y = y_1 - \sqrt{(\delta(x) + R_{drill})^2 - \left(x + \frac{w_{tr\_d}}{2}\right)^2}. \quad (\Gamma 19)$$

Рассмотрим отдельно подкоренную часть выражения (Г19) и упростим его (Г20):

$$(\delta(x) + R_{drill})^2 - \left(x + \frac{w_{tr\_d}}{2}\right)^2 =$$

$$= \left(\delta(x) + R_{drill} + x + \frac{w_{tr\_d}}{2}\right)\left(\delta(x) + R_{drill} - x - \frac{w_{tr\_d}}{2}\right)$$

$$= \left|\delta(x) = \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}}x + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2}\right| =$$

$$= \left(\frac{w_{tr\_d}x}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} + R_{drill} + x + \frac{w_{tr\_d}}{2}\right) *$$

$$* \left(\frac{w_{tr\_d}x}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} + R_{drill} - x - \frac{w_{tr\_d}}{2}\right) =$$

$$\begin{aligned}
&= \left( \left[ \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} + 1 \right] x + \left[ R_{drill} + \frac{w_{tr\_d}}{2} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} \right] \right) * \\
&* \left( \left[ \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} - 1 \right] x + \left[ R_{drill} - \frac{w_{tr\_d}}{2} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} \right] \right). \\
&\quad (\delta(x) + R_{drill})^2 - \left( x + \frac{w_{tr\_d}}{2} \right)^2 = \\
&\left( \left[ \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} + 1 \right] x + \left[ R_{drill} + \frac{w_{tr\_d}}{2} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} \right] \right) * \\
&* \left( \left[ \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} - 1 \right] x + \left[ R_{drill} - \frac{w_{tr\_d}}{2} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} \right] \right). \tag{Г20}
\end{aligned}$$

Проведем замены (Г21):

$$\begin{aligned}
a &= \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} + 1; \quad b = R_{drill} + \frac{w_{tr\_d}}{2} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2}; \\
c &= \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} - 1; \quad d = R_{drill} - \frac{w_{tr\_d}}{2} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2}. \tag{Г21}
\end{aligned}$$

С учетом замен (Г21) выражение (Г20) примет вид (Г22):

$$\begin{aligned}
&\left( \left[ \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} + 1 \right] x + \left[ R_{drill} + \frac{w_{tr\_d}}{2} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} \right] \right) * \\
&* \left( \left[ \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} - 1 \right] x + \left[ R_{drill} - \frac{w_{tr\_d}}{2} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} \right] \right) = \\
&= (ax + b) * (cx + d) = acx^2 + (ad + bc)x + bd. \tag{Г22}
\end{aligned}$$

Найдем составляющие при степенях  $x$ :

$$\begin{aligned}
ac &= \left( \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} + 1 \right) \left( \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} - 1 \right) = \\
&= \frac{w_{tr\_d}^2}{(2R_{drill} + w_{tr\_d\_min})^2} - 1; \\
ad &= \left( \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} + 1 \right) \left( R_{drill} - \frac{w_{tr\_d}}{2} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} \right) = \\
&= \frac{w_{tr\_d}R_{drill} - 0,5w_{tr\_d}^2 + 0,5w_{tr\_d}w_{tr\_d\_min}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} + R_{drill} - \frac{w_{tr\_d}}{2} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2};
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
cb &= \left( \frac{w_{tr\_d}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} - 1 \right) \left( R_{drill} + \frac{w_{tr\_d}}{2} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} \right) = \\
&= \frac{w_{tr\_d}R_{drill} + 0,5w_{tr\_d}^2 + 0,5w_{tr\_d}w_{tr\_d\_min}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} - R_{drill} - \frac{w_{tr\_d}}{2} - \frac{w_{tr\_d\_min}}{2}; \\
ad + cb &= \\
&= \frac{w_{tr\_d}R_{drill} - \frac{w_{tr\_d}^2}{2} + \frac{w_{tr\_d}w_{tr\_d\_min}}{2} + w_{tr\_d}R_{drill} + \frac{w_{tr\_d}^2}{2} + \frac{w_{tr\_d}w_{tr\_d\_min}}{2}}{w_m + 2R_{drill}} + \\
&+ R_{drill} - \frac{w_{tr\_d}}{2} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} - R_{drill} - \frac{w_{tr\_d}}{2} - \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} = \\
&= \frac{2w_{tr\_d}R_{drill} + w_{tr\_d}w_{tr\_d\_min}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} - w_c = \\
&= \frac{2w_{tr\_d}R_{drill} + w_{tr\_d}w_{tr\_d\_min} - w_{tr\_d}w_{tr\_d\_min} - 2w_{tr\_d}R_{drill}}{w_{tr\_d\_min} + 2R_{drill}} = 0; \\
bd &= \left( R_{drill} + \frac{w_{tr\_d}}{2} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} \right) \left( R_{drill} - \frac{w_{tr\_d}}{2} + \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} \right) = \\
&= R_{drill}^2 - R_{drill} \frac{w_{tr\_d}}{2} + R_{drill} \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} + R_{drill} \frac{w_{tr\_d}}{2} - \frac{w_{tr\_d}^2}{4} + \frac{w_{tr\_d}w_{tr\_d\_min}}{4} + \\
&+ R_{drill} \frac{w_{tr\_d\_min}}{2} - \frac{w_{tr\_d}w_{tr\_d\_min}}{4} + \frac{w_{tr\_d\_min}^2}{4} = \\
&= \frac{4R_{drill}^2 + 4R_{drill}w_{tr\_d\_min} + w_{tr\_d\_min}^2 - w_{tr\_d}^2}{4} = \\
&= \frac{(2R_{drill} + w_{tr\_d\_min})^2 - w_{tr\_d}^2}{4}.
\end{aligned}$$

Тогда исходное выражение уравнение (Г14) можно представить в виде эллипса с полуосями  $a_{tr\_d\_min}$  и  $b_{tr\_d\_min}$  (Г23):

$$(y - y_1)^2 = acx^2 + bd \Rightarrow -\frac{ac}{bd}x^2 + \frac{(y - y_1)^2}{bd} = 1 \Rightarrow \frac{x^2}{a_{tr\_d\_min}^2} + \frac{(y - y_1)^2}{b_{tr\_d\_min}^2} = 1;$$

$$a_{tr\_d\_min} = \sqrt{-\frac{bd}{ac}} = \sqrt{-\frac{\left[ \frac{(2R_{drill} + w_{tr\_d\_min})^2 - w_{tr\_d}^2}{4} \right]}{\left[ \frac{w_{tr\_d}^2}{(2R_{drill} + w_{tr\_d\_min})^2} - 1 \right]}} =$$

$$= \sqrt{-\frac{\left((2R_{drill} + w_{tr\_d\_min})^2 - w_{tr\_d}^2\right)(2R_{drill} + w_{tr\_d\_min})^2}{4\left(w_{tr\_d}^2 - (2R_{drill} + w_{tr\_d\_min})^2\right)}} = \frac{2R_{drill} + w_{tr\_d\_min}}{2};$$

$$w_{tr\_d\_min} = \sqrt{bd} = \sqrt{\frac{(2R_{drill} + w_{tr\_d\_min})^2 - w_{tr\_d}^2}{4}} =$$

$$= \frac{\sqrt{(2R_{drill} + w_{tr\_d\_min})^2 - w_c^2}}{2}.$$

Таким образом, решение системы (Г15) описывается системой (Г23):

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a_{tr\_d\_min}^2} + \frac{(y - y_1)^2}{b_{tr\_d\_min}^2} = 1; \\ a_{tr\_d\_min} = 0,5w_{tr\_d\_min} + R_{drill}; \\ b_{tr\_d\_min} = \frac{\sqrt{(2R_{drill} + w_{tr\_d\_min})^2 - w_{tr\_d}^2}}{2}. \end{cases} \quad (\text{Г23})$$

Аналогично решению (Г14) полученный результат (Г23), также имеет фиктивное решение в виде верхней половины эллипса, которое при дальнейшем рассмотрении не учитывается.

Для получения функционального описания области допустимого смещения центра отверстия относительно центра контактной площадки  $D_{Ci}$  необходимо решить систему уравнений (Г24):

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = r^2 \\ \frac{x^2}{a_{tr\_d\_min}^2} + \frac{(y - y_1)^2}{b_{tr\_d\_min}^2} = 1, y_1 - b_{tr\_d\_min} \leq r \leq R_{Ci}. \end{cases} \quad (\text{Г24})$$

Выразим из верхнего уравнения системы (Г24)  $x^2$  и подставим в нижнее (Г20):

$$\frac{r^2 - y^2}{a_{tr\_d\_min}^2} + \frac{(y - y_1)^2}{b_{tr\_d\_min}^2} = 1;$$

$$(a_{tr\_d\_min}^2 - b_{tr\_d\_min}^2)y^2 - (2a_{tr\_d\_min}^2y_1)y + (a_{tr\_d\_min}^2y_1^2 - a_{tr\_d\_min}^2b_{tr\_d\_min}^2 + b_{tr\_d\_min}^2r^2) = 0. \quad (\text{Г25})$$

Решение полученного квадратного уравнения (Г25) описывается формулой (Г26):

$$y(r) = \frac{a_{tr\_d\_min}^2 y_1 \pm \sqrt{s'}}{a_{tr\_d\_min}^2 - b_{tr\_d\_min}^2}, \quad (\text{Г26})$$

где  $s'$  (Г27):

$$s' = a_{tr\_d\_min}^4 y_1^2 - (a_{tr\_d\_min}^2 - b_{tr\_d\_min}^2) * (a_{tr\_d\_min}^2 y_1^2 - a_{tr\_d\_min}^2 b_{tr\_d\_min}^2 + b_{tr\_d\_min}^2 r^2). \quad (\text{Г27})$$

С учетом упрощений  $s'$  (Г27) можно представить в виде (Г28):

$$\begin{aligned} s' &= a_{tr\_d\_min}^4 y_1^2 - (a_{tr\_d\_min}^4 y_1^2 - a_{tr\_d\_min}^4 b_{tr\_d\_min}^2 + a_{tr\_d\_min}^2 b_{tr\_d\_min}^2 r^2 - \\ &- a_{tr\_d\_min}^2 b_{tr\_d\_min}^2 y_1^2 + a_{tr\_d\_min}^2 b_{tr\_d\_min}^4 - b_{tr\_d\_min}^4 r^2) = \\ &= a_{tr\_d\_min}^4 b_{tr\_d\_min}^2 - a_{tr\_d\_min}^2 b_{tr\_d\_min}^2 r^2 + a_{tr\_d\_min}^2 b_{tr\_d\_min}^2 y_1^2 - \\ &- a_{tr\_d\_min}^2 b_{tr\_d\_min}^4 + b_{tr\_d\_min}^4 r^2 = \\ &= b_{tr\_d\_min}^2 [a_{tr\_d\_min}^2 (a_{tr\_d\_min}^2 - b_{tr\_d\_min}^2 + y_1^2) - r^2 (a_{tr\_d\_min}^2 - b_{tr\_d\_min}^2)] = \\ &= b_{tr\_d\_min}^2 [a_{tr\_d\_min}^2 (s + y_1^2) - r^2 s], \text{ при } s = a_{tr\_d\_min}^2 - b_{tr\_d\_min}^2. \\ s' &= b_{tr\_d\_min}^2 [a_{tr\_d\_min}^2 (s + y_1^2) - r^2 s], \text{ при } s = a_{tr\_d\_min}^2 - b_{tr\_d\_min}^2. \end{aligned} \quad (\text{Г28})$$

С учетом выражения (Г28), а также рассмотрения решения только для нижней половины эллипса (Г23), уравнение (Г26) можно записать в виде системы (Г29):

$$\begin{cases} y_2(r) = y(r) = \frac{a_{tr\_d\_min}^2 y_1 - b_{tr\_d\_min} \sqrt{a_{tr\_d\_min}^2 (s + y_1^2) - r^2 s}}{s} \\ s = a_{tr\_d\_min}^2 - b_{tr\_d\_min}^2 \end{cases}, \quad (\text{Г29})$$

выразим  $x(r)$  из исходной системы (Г24), рассматривая решение при  $x > 0$  (Г30):

$$x(r) = x_2(r) = \sqrt{r^2 - y_2^2(r)}. \quad (\text{Г30})$$

Тогда, в полярной системе координат решение системы (Г24) будет иметь вид (Г31):

$$\varphi(r) = \arctg\left(\frac{y_2(r)}{x_2(r)}\right), y_1 - b_{tr\_d\_min} \leq r \leq R_{Ci}. \quad (\text{Г31})$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

**Характеристики смещения координат реперных точек относительно эталона**  
**(совмещение с помощью общей матрицы перехода)**

| Номер реперной точки, $i$ | Выборочное среднее смещения по оси X, $m_{x_k}$ , мм | Выборочное СКО смещения по оси X, $\sigma_{x_k}$ , мм | Выборочное среднее смещения по оси Y, $m_{y_k}$ , мм | Выборочное СКО смещения по оси Y, $\sigma_{y_k}$ , мм | Выборочный коэффициент корреляции $\rho_k$ |
|---------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1                         | 152                                                  | 30                                                    | -37                                                  | 31                                                    | 0,04                                       |
| 2                         | -85                                                  | 31                                                    | -46                                                  | 30                                                    | -0,14                                      |
| 3                         | 163                                                  | 39                                                    | 50                                                   | 33                                                    | 0,11                                       |
| 4                         | 97                                                   | 33                                                    | -23                                                  | 31                                                    | 0,14                                       |
| 5                         | 39                                                   | 26                                                    | 22                                                   | 30                                                    | 0,00                                       |
| 6                         | -53                                                  | 29                                                    | -31                                                  | 31                                                    | 0,10                                       |
| 7                         | 77                                                   | 32                                                    | 44                                                   | 33                                                    | -0,28                                      |
| 8                         | 58                                                   | 25                                                    | 24                                                   | 28                                                    | 0,01                                       |
| 9                         | 72                                                   | 29                                                    | -19                                                  | 32                                                    | -0,13                                      |
| 10                        | -22                                                  | 45                                                    | 39                                                   | 42                                                    | 0,37                                       |
| 11                        | -37                                                  | 30                                                    | -86                                                  | 34                                                    | -0,05                                      |
| 12                        | -84                                                  | 30                                                    | -18                                                  | 43                                                    | -0,10                                      |
| 13                        | 3                                                    | 29                                                    | 125                                                  | 34                                                    | -0,16                                      |
| 14                        | 11                                                   | 35                                                    | -50                                                  | 31                                                    | 0,13                                       |
| 15                        | 9                                                    | 28                                                    | -57                                                  | 32                                                    | 0,13                                       |
| 16                        | -42                                                  | 34                                                    | 20                                                   | 41                                                    | -0,01                                      |
| 17                        | -10                                                  | 31                                                    | 28                                                   | 36                                                    | 0,08                                       |
| 18                        | 13                                                   | 34                                                    | 41                                                   | 28                                                    | -0,02                                      |
| 19                        | 123                                                  | 33                                                    | -94                                                  | 33                                                    | -0,03                                      |
| 20                        | 21                                                   | 37                                                    | 16                                                   | 30                                                    | 0,15                                       |
| 21                        | 29                                                   | 33                                                    | 11                                                   | 30                                                    | 0,08                                       |
| 22                        | -88                                                  | 37                                                    | -3                                                   | 45                                                    | 0,54                                       |
| 23                        | -94                                                  | 33                                                    | 37                                                   | 27                                                    | -0,04                                      |
| 24                        | 81                                                   | 34                                                    | 117                                                  | 29                                                    | -0,01                                      |
| 25                        | 107                                                  | 40                                                    | 75                                                   | 33                                                    | 0,06                                       |
| 26                        | 25                                                   | 35                                                    | 59                                                   | 27                                                    | -0,08                                      |
| 27                        | -148                                                 | 36                                                    | -39                                                  | 27                                                    | -0,03                                      |
| 28                        | -38                                                  | 34                                                    | 104                                                  | 30                                                    | -0,01                                      |
| 29                        | -152                                                 | 31                                                    | -75                                                  | 36                                                    | 0,33                                       |
| 30                        | -41                                                  | 33                                                    | -104                                                 | 36                                                    | -0,03                                      |
| 31                        | 56                                                   | 30                                                    | -8                                                   | 38                                                    | -0,30                                      |
| 32                        | -43                                                  | 32                                                    | 42                                                   | 38                                                    | 0,15                                       |
| 33                        | -109                                                 | 37                                                    | 35                                                   | 35                                                    | -0,30                                      |
| 34                        | 1                                                    | 29                                                    | 56                                                   | 39                                                    | -0,13                                      |
| 35                        | -44                                                  | 32                                                    | -4                                                   | 37                                                    | 0,00                                       |
| 36                        | 76                                                   | 30                                                    | -73                                                  | 29                                                    | 0,16                                       |

| Номер<br>реперной<br>точки, $i$ | Выборочное<br>среднее<br>смещения по<br>оси X, $m_{x_k}$ , мм | Выборочное<br>СКО смещения<br>по оси X,<br>$\sigma_{x_k}$ , мм | Выборочное<br>среднее<br>смещения по<br>оси Y, $m_{y_k}$ , мм | Выборочное<br>СКО<br>смещения по<br>оси Y, $\sigma_{y_k}$ , мм | Выборочный<br>коэффициент<br>корреляции<br>$\rho_k$ |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 37                              | 96                                                            | 32                                                             | 23                                                            | 34                                                             | 0,02                                                |
| 38                              | 54                                                            | 32                                                             | 63                                                            | 35                                                             | -0,01                                               |
| 39                              | 62                                                            | 37                                                             | -6                                                            | 35                                                             | -0,04                                               |
| 40                              | -42                                                           | 39                                                             | 61                                                            | 40                                                             | -0,51                                               |
| 41                              | 92                                                            | 34                                                             | -21                                                           | 33                                                             | -0,26                                               |
| 42                              | 4                                                             | 40                                                             | 27                                                            | 31                                                             | -0,21                                               |
| 43                              | -125                                                          | 33                                                             | -127                                                          | 30                                                             | -0,08                                               |
| 44                              | 75                                                            | 31                                                             | -12                                                           | 36                                                             | 0,00                                                |
| 45                              | -50                                                           | 37                                                             | -55                                                           | 29                                                             | 0,06                                                |
| 46                              | 41                                                            | 33                                                             | 30                                                            | 31                                                             | 0,05                                                |
| 47                              | 82                                                            | 28                                                             | 68                                                            | 32                                                             | 0,10                                                |
| 48                              | -85                                                           | 31                                                             | -47                                                           | 35                                                             | 0,00                                                |
| 49                              | -109                                                          | 32                                                             | -31                                                           | 33                                                             | 0,13                                                |
| 50                              | -219                                                          | 39                                                             | -148                                                          | 34                                                             | 0,40                                                |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

### Листинг программного обеспечения, реализующего метод оценки вероятности выхода годных печатных плат

Модули программного обеспечения реализованы на языке программирования Python (версия интерпретатора: 3.11).

#### Модуль «main.py»

```
import cv2
from modules import dot_finder as df
from modules import dot_sorter as ds
from modules import mesh_combiner as mc
from modules import probability_estimator as pe

IS_MESH = 1
P_req = 0.97

pcb_parameters = pe.read_parameters("pcb_parameters.json") # Чтение конструктивных
параметров проекта печатной платы из json-файла
factory_parameters = pe.read_parameters("factory_parameters.json") # Чтение
технологических параметров производственной линии из json-файла
P_result = pe.P_pcb(pcb_parameters, factory_parameters) # Расчет вероятности
выхода годной печатной платы
if P_result < P_req:
    print (f"Вероятность выхода годной печатной платы ниже заданной: расчетное
значение: <{P_result}>, требуемое значение: <{P_req}>")

camera_filename = 'camera_reper_dots.csv' # Имя csv файла с координатами
распознанных реперных точек на фотографии с видеокамеры
matrix_filename = 'CALIBRATION/CALIBRATION_DATA/image_circles.csv' # Имя csv файла
с координатами распознанных реперных точек на изображении калибровочного шаблона

cam_images = ds.images_get(camera_filename) # Чтение координат реперных точек с
видеокамеры [[Окружность 1, Окружность 2 ...], [Изображение 2]...]
cam_avg_image = ds.avg_image_get(cam_images) # Усреднение координат реперных точек
с видеокамеры
cam_avg_image_sort = ds.image_sort(cam_avg_image, 0.1, Yaxis = True) # Сортировка
координат реперных точек на изображении видеокамеры

matrix_images = ds.images_get(matrix_filename) # Чтение координат реперных точек с
калибровочного изображения
matrix_avg_image = ds.avg_image_get(matrix_images) # Усреднение координат реперных
точек с калибровочного изображения
matrix_avg_image_sort = ds.image_sort(matrix_avg_image, 0.1, Yaxis = True) #
Сортировка координат реперных точек на калибровочном изображении

transformer_matrix = ds.get_transformer_matrix(cam_avg_image_sort,
matrix_avg_image_sort) # Получение матрицы преобразования "камера - ЖК-матрица"

top_img = cv2.imread("GENERATION/IMAGE_DATA/Top.png") # Чтение изображения слоя
топологии ПП
top_img = cv2.flip(top_img, 1) # Отражение изображения для компенсации поворота
видеокамеры
mask_img = cv2.imread("GENERATION/IMAGE_DATA/Drill.png") # Чтение изображения слоя
сверловки (реперных точек)
```

```

mask_hough_circles = df.image_circle_finder(mask_img, show_circles=-1) #
Распознавание реперных точек на изображении сверловки

for circle in mask_hough_circles:
    cv2.circle(top_img, (int(circle[0]),int(circle[1])), int(circle[2]), (0, 255,
0) ,2)
    cv2.circle(top_img, (int(circle[0]), int(circle[1])), 2, (0, 255, 0), 2)

mask_image_list = df.hough_circles_to_image(mask_hough_circles) # Формирование
списка с координатами распознанных реперных знаков на файле сверловки
mask_image_list_sort = ds.image_sort(mask_image_list, alpha=0.05, Yaxis=True) #
Сортировка списка с координатами распознанных реперных знаков на файле сверловки
df.hough_parameters_definer(mask_image_list) # Определение параметров
распознавания для изображения заготовки с видеокамеры

cam_img = cv2.imread("camera_sample.tiff") # Загрузка изображения с заготовкой на
рабочем поле

res = cv2.warpAffine(cam_img, transformer_matrix, (3840,2400)) # Применение
матрицы перехода "Камера - ЖК-матрица" к изображению заготовки

res1 = cv2.medianBlur(res, 5) # Медианная фильтрация изображения заготовки
res_hough_circles = df.image_circle_finder(res1, hough_min_radius=10,
hough_max_radius=30, show_circles = 0, hough_min_dist=140, hough_param1= 11,
hough_param2=14) #Распознавание отверстий (реперных точек) на изображении
заготовки
res_image = df.hough_circles_to_image(res_hough_circles) # Формирование списка с
координатами распознанных реперных точек на изображении заготовки
sort_res_image = ds.image_sort_with_rotation(res_image, Yaxis=True, alpha=0.075) #
Сортировка списка с координатами распознанных реперных точек на изображении
заготовки

result_image = None
if IS_MESH:
    coordinates1 = [] # Список координат центров шаблона топологии
    coordinates2 = [] # Список координат центров фото заготовки
    circles_number = len(mask_image_list_sort)
    for i in range(circles_number):
        coordinates1.append(mask_image_list_sort[i].origin)
        coordinates2.append(sort_res_image[i].origin)
    match_image_photo_list = [coordinates1, coordinates2] # Список с
сопоставленными парами координат [[X11, Y11], ..., [X1N, Y1N]], [[X21, Y21],
..., [X2N, Y2N]]
    for i in range(2):
        for j in range(circles_number):
            match_image_photo_list[i][j][0] = int(match_image_photo_list[i][j][0])
            match_image_photo_list[i][j][1] = int(match_image_photo_list[i][j][1])
        result_image = mc.transform_image(mask_img, res, match_image_photo_list) #
Формирование изображения шаблона
else:
    tm2 = ds.get_transformer_matrix(mask_image_list_sort, sort_res_image) # Расчет
матрицы перехода "ЖК-матрица - Заготовка"
    result_image = cv2.warpAffine(top_img, tm2, (3840,2400)) # Применение матрицы
перехода "ЖК-матрица - Заготовка" к файлу топологии

mask_img = cv2.imread("mask.png") # Загрузка файла компенсирующей маски
result_image_with_mask = cv2.subtract(result_image, mask_img) # Применение
компенсирующей маски к изображению топологии
result_image_with_mask_out = df.image_conversion_to_matrix(input_image=result_imag
e_with_mask) # Кодирование изображения в формат ЖК-матрицы
cv2.imwrite("result.tiff", result_image_with_mask_out) # Сохранение файла
закодированного для ЖК-матрицы шаблона

```

## Модуль «image\_generator.py»

```

import os
from tabnanny import verbose
import gerber
from gerber import PCB
from gerber import load_layer
from gerber import layers
from gerber.render import RenderSettings, theme
from gerber.render.cairo_backend import GerberCairoContext

import cv2
import numpy as np

# Параметры преобразования изображения
HORIZONTAL_RES = 3840
VERTICAL_RES = 2400
RES_MULTIPLIER = 1
GERBER_FOLDER = 'GERBER_DATA'
IMAGE_FOLDER = 'IMAGE_DATA'
MASK_IMAGE_NAME = 'Top.png'
DRILL_IMAGE_NAME = 'Drill.png'
GERBER_PATH = os.path.abspath(os.path.join(os.path.dirname(__file__),
GERBER_FOLDER))

# Функция создания изображения шаблона в разрешении ЖК-матрицы (3840x2400)
def mask_generator():
    pcb = PCB.from_directory(GERBER_FOLDER, verbose=True)
    ctx = GerberCairoContext()
    ctx.render_layers(pcb.top_layers, os.path.join(os.path.dirname(__file__),
IMAGE_FOLDER, MASK_IMAGE_NAME),
                    theme.THEMES['Black_inv'],
max_width=HORIZONTAL_RES*RES_MULTIPLIER, max_height=VERTICAL_RES*RES_MULTIPLIER,
verbose=True)
    layer_img = cv2.imread(IMAGE_FOLDER+"/"+MASK_IMAGE_NAME)
    cw = len(layer_img[0])
    ch = len(layer_img)
    tw = HORIZONTAL_RES*RES_MULTIPLIER
    th = VERTICAL_RES*RES_MULTIPLIER
    dw = (tw - cw)/2
    dh = (th - ch)/2
    print(f"CURRENT RESOLUTION: <w:{cw}, h:{ch}>, TARGET RESOLUTION <tw:{tw},
th:{th}>, OFFSET: <dw:{dw}, dh:{dh}>")
    transformer_matrix = np.array([[1,0,dw],[0,1,dh]])
    print(transformer_matrix)
    layer_img = cv2.warpAffine(layer_img, transformer_matrix, (tw, th))
    os.remove(IMAGE_FOLDER+"/"+MASK_IMAGE_NAME)
    cv2.imwrite(IMAGE_FOLDER+"/"+MASK_IMAGE_NAME, layer_img)

# Функция кодирования изображения в формат ЖК-матрицы (1280x2400)
def image_conversion_to_matrix(isFile = False, filename = None,
input_image = None):
    image = None
    if isFile == True:
        image = cv2.imread(filename)
    else:
        image = input_image
    gs_image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    im_clr = 3
    im_row = 0
    im_col = 0
    for image_row in image:
        if im_col == 0:
            for image_col in image_row:
                im_col += 1
            im_row += 1

```



```

print(f"row: <{im_row}>, col: <{im_col}>")
new_col_add = im_col % 3
new_col = int(im_col / 3)
print(f"new_col_add: <{new_col_add}>, new_col: <{new_col}>")
if new_col_add > 0:
    image_conv_RGB = np.zeros([im_row, new_col + 1, im_clr], np.uint8)
    for row in range(im_row):
        for pix in range(new_col):
            image_conv_RGB[row][pix][0] = gs_image[row][pix * 3 + 2]
            image_conv_RGB[row][pix][1] = gs_image[row][pix * 3 + 1]
            image_conv_RGB[row][pix][2] = gs_image[row][pix * 3 + 0]
        if new_col_add == 1:
            image_conv_RGB[row][new_col][0] = 0
            image_conv_RGB[row][new_col][1] = 0
            image_conv_RGB[row][new_col][2] = gs_image[row][pix * 3 + 0]
        elif new_col_add == 2:
            image_conv_RGB[row][new_col][0] = 0
            image_conv_RGB[row][new_col][1] = gs_image[row][pix * 3 + 1]
            image_conv_RGB[row][new_col][2] = gs_image[row][pix * 3 + 0]
    else:
        image_conv_RGB = np.zeros([im_row, new_col, im_clr], np.uint8)
        for row in range(im_row):
            for pix in range(new_col):
                image_conv_RGB[row][pix][0] = gs_image[row][pix * 3 + 2]
                image_conv_RGB[row][pix][1] = gs_image[row][pix * 3 + 1]
                image_conv_RGB[row][pix][2] = gs_image[row][pix * 3 + 0]
if isFile:
    filename_parts = filename.split(".")
    filename_parts[-2] = filename_parts[-2] + "_matrix"
    new_filename = ".".join(filename_parts)
    cv2.imwrite(new_filename, image_conv_RGB)
else:
    return image_conv_RGB

```

### Модуль «dot\_finder.py»

```

import os
import cv2
import numpy as np
import math
import time
import csv
from modules import dot_sorter as ds

SHOW_HOR_RES = 1280
SHOW_VERT_RES = 800

# Функция поиска реперных знаков на изображении
def image_circle_finder(frame, gaussian_filter_size = 5,
    gaussian_filter_sigm = 20, hough_dp = 0.001, hough_min_dist = 10,
    hough_param1 = 10, hough_param2 = 15, hough_min_radius = 5,
    hough_max_radius = 150, show_circles = -1):
    gray_frame = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    blur_frame = cv2.GaussianBlur(gray_frame,
    (gaussian_filter_size, gaussian_filter_size), gaussian_filter_sigm)
    circles = cv2.HoughCircles(blur_frame, cv2.HOUGH_GRADIENT, dp=hough_dp,
    minDist = hough_min_dist, param1=hough_param1, param2=hough_param2,
    minRadius=hough_min_radius, maxRadius=hough_max_radius)
    if circles is not None:
        if (show_circles > -1):
            for circle in circles[0]:
                cv2.circle(frame, (int(circle[0]), int(circle[1])),
                int(circle[2]), (0, 0, 255), 2)

```

```

        cv2.circle(frame, (int(circle[0]), int(circle[1])), 3, (0, 0,
255), 2)

        cv2.namedWindow(f"image", cv2.WINDOW_NORMAL)
        cv2.resizeWindow(f"image", SHOW_HOR_RES, SHOW_VERT_RES)
        cv2.imshow("image", frame)
        cv2.waitKey(show_circles)
        return circles[0]
    else:
        print("Can't find circles")
        return None

# Функция создания списка из найденных реперных знаков
def hough_circles_to_image(hough_circles):
    image = []
    circle_num = 0
    for circle in hough_circles:
        try:
            circle_buf = ds.Circle(circle_num, [circle[0], circle[1]], circle[2])
            image.append(circle_buf)
            circle_num += 1
        except IndexError:
            print("Impossible to convert circles to image")
    return image

# Функция сохранения координат реперных знаков с изображения в csv файл
def save_image(image, csv_filename):
    with open(csv_filename, 'a', newline='') as file:
        writer = csv.writer(file, delimiter=',')
        for circle in image:
            writer.writerow([circle.num, circle.origin[0], circle.origin[1],
circle.radius])

# Функция сохранения координат реперных знаков с нескольких изображений в csv файл
def save_images(images, csv_filename):
    with open(csv_filename, 'w', newline='') as file:
        writer = csv.writer(file, delimiter=',')
        for image in images:
            for circle in image:
                writer.writerow([circle.num, circle.origin[0], circle.origin[1],
circle.radius])

# Функция определения параметров преобразования Хафа для поиска реперных знаков на
изображения с видеокamеры
def hough_parameters_definer(image):
    min_radius = 1000000000000
    max_radius = 0
    min_distance = 1000000000000
    for i in range(0, len(image)):
        for j in range(0, len(image)):
            distance = ((image[i].origin[0]-image[j].origin[0])**2+(image[i].origin[1]-image[j].origin[1])**2)**0.5
            if i != j and distance < min_distance:
                min_distance = distance
            if image[i].radius > max_radius:
                max_radius = image[i].radius
            if image[i].radius < min_radius:
                min_radius = image[i].radius
    print(f"{min_radius}, {max_radius}, {min_distance}")

# Класс получения потока с видеокamеры
class VideoStreamWidget(object):
    # Метод-конструктор для инициализации потока с видеокamеры
    def __init__(self, src=0, hor_res = 3264, vert_res = 2448,
codec = cv2.VideoWriter_fourcc(*"MJPG"),

```

```

        autofocus = 0, focus = 250, fps = 10, autowb = 0,
focus_delay = 2, show_parameters = False):
    self.src = src
    self.stream = cv2.VideoCapture(self.src)
    if not self.stream.isOpened():
        print("Can't open camera")
        return None
    self.stream.set(cv2.CAP_PROP_FOURCC, codec)
    self.stream.set(cv2.CAP_PROP_FPS, fps)
    self.stream.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH, hor_res)
    self.stream.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT, vert_res)
    self.stream.set(cv2.CAP_PROP_AUTOFOCUS, autofocus)
    self.stream.set(cv2.CAP_PROP_FOCUS, focus)
    self.stream.set(cv2.CAP_PROP_AUTO_WB, autowb)
    self.focus_delay = focus_delay
    if show_parameters:
        print(f"Width: <{self.stream.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH)}>, height:
<{self.stream.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT)}>," \
              f"fps: {self.stream.get(cv2.CAP_PROP_FPS)}, codec:
<{hex(int(self.stream.get(cv2.CAP_PROP_FOURCC)))}>," \
              f"autofocus: <{self.stream.get(cv2.CAP_PROP_AUTOFOCUS)}>," \
              f"focus: {self.stream.get(cv2.CAP_PROP_FOCUS)}," \
              f"autowb: <{self.stream.get(cv2.CAP_PROP_AUTO_WB)}>")

    # Метод установки фокуса на видеокамере
    def try_focus(self):
        cur_time = time.time()
        while self.stream.isOpened() and time.time() - cur_time <
self.focus_delay:
            ret, frame = self.stream.read()
            self.stream.set(cv2.CAP_PROP_FOCUS, 0)
            cur_time = time.time()
            while self.stream.isOpened() and time.time() - cur_time <
self.focus_delay:
                ret, frame = self.stream.read()
                self.stream.set(cv2.CAP_PROP_FOCUS, CAM_FOCUS)

    # Метод получения серии изображений с видеокамеры
    def get_circle_sample(self, timeout = 10, show_circles=1, hough_dp=1,
hough_param1 = 30, hough_param2 = 40, hough_min_dist = 100,
hough_max_radius = 100, hough_min_radius = 10):
        cur_time = time.time()
        images = []
        while self.stream.isOpened() and time.time() - cur_time < timeout:
            ret, frame = self.stream.read()
            hough_circles = image_circle_finder(frame = frame,
show_circles = show_circles, hough_dp = hough_dp, hough_param1 = hough_param1,
hough_param2 = hough_param2, hough_max_radius,
hough_min_radius = hough_min_radius, hough_min_dist = hough_min_dist)
            image = hough_circles_to_image(hough_circles)
            images.append(image)
        return images

```

### Модуль «dot\_sorter.py»

```

import csv
from math import atan
from math import sin
from math import cos
import numpy as np
import cv2

# Класс реперного знака
class Circle:

```

```

# Метод-конструктор инициализации реперного знака
def __init__(self, num, origin, radius):
    self.num = num
    self.origin = origin
    self.radius = radius

# Функция чтения координат реперных точек из csv-файла
def images_get(filename):
    with open(filename) as file:
        reader = csv.reader(file)
        images = []
        image = []
        circle_max = 0
        im_circle_max = 0
        im_num = 0
        for row in reader:
            try:
                circle = Circle(int(row[0]), [float(row[1]), float(row[2])],
float(row[3]))
                if circle.num == 0 and len(image) != 0:
                    if len(image) > circle_max:
                        if (len(images) != 0):
                            print (f'Warning: difference between images (was
{circle_max} max_dots, now {len(image)}).')
                            circle_max = len(image)
                            im_circle_max = im_num
                            images.append(image)
                            image = []
                            im_num += 1
                            image.append(circle)
                        except IndexError:
                            print("Impossible to parse row.")
                    images.append(image)
                    avg_circles_list = images[im_circle_max]
                    images[im_circle_max] = images[0]
                    images[0] = avg_circles_list
                return images

# Функция копирования списка с координатами реперных точек
def image_copy(image):
    im_copy = []
    for circle in image:
        im_copy.append(circle)
    return im_copy

# Функция создания пустого списка с координатами реперных точек необходимой длины
def image_zeros(len):
    image = []
    for circle_num in range(0, len):
        image.append(Circle(circle_num, [0, 0], 0))
    return image

# Функция сопоставления реперных точек на двух изображениях по спискам с
координатами реперных точек
def circles_equalizer(base_image, twin_image):
    if twin_image is not base_image:
        for twin_circle in twin_image:
            distance_min = 1000000000000000
            for base_circle in base_image:
                distance = (base_circle.origin[0]-twin_circle.origin[0])**2+(base_
circle.origin[1]-twin_circle.origin[1])**2

                if distance < distance_min:
                    distance_min = distance

```

```

        twin_circle.num = base_circle.num
    else:
        print('Equalized same images.')
    return twin_image

# Функция поворота изображения
def image_rotate(image):
    X_min = 10000000000
    Y_min = 10000000000
    X_max = 0
    Y_max = 0
    Edge_circles = [None]*4
    for circle in image:
        if circle.origin[0] > X_max:
            X_max = circle.origin[0]
            Edge_circles[0] = circle
        if circle.origin[0] < X_min:
            X_min = circle.origin[0]
            Edge_circles[1] = circle
        if circle.origin[1] > Y_max:
            Y_max = circle.origin[1]
            Edge_circles[2] = circle
        if circle.origin[1] < Y_min:
            Y_min = circle.origin[1]
            Edge_circles[3] = circle
    close_circle_dist = 1000000000000000
    close_circle_i = None
    i = 0
    for circle in Edge_circles:
        circle_dist = circle.origin[0]**2+circle.origin[1]**2
        if circle_dist < close_circle_dist:
            close_circle_dist = circle_dist
            close_circle_i = i
        i += 1
    angle = 0
    if close_circle_i == 1:
        print("Xmin")
        k = (Edge_circles[1].origin[0] - Edge_circles[3].origin[0])/(Edge_circles[
1].origin[1] - Edge_circles[3].origin[1])
        angle = -3.141592/2-atan(k)
        print(angle*180/3.1415192)
    elif close_circle_i == 3:
        print("Ymin")
        k = (Edge_circles[3].origin[0] - Edge_circles[0].origin[0])/(Edge_circles[
3].origin[1] - Edge_circles[0].origin[1])
        angle = 3.141592/2-atan(k)
        print(angle)
    else:
        print("Can't define angle")
    rot_image = []
    for circle in image:
        #print(image)
        rot_image.append(Circle(circle.num, [circle.origin[0]*cos(-angle)-circle.o
rigin[1]*sin(-angle),
                                circle.origin[0]*sin(-angle)+circle.o
rigin[1]*cos(-angle)], circle.radius))
    return rot_image

# Функция пересортировки реперных точек для обеспечения единства порядка
следования реперных точек в списках реперных точек
def image_change_origin(image_old_origin, image_new_origin):
    if len(image_old_origin) != len(image_new_origin):
        print("Image change origin impossible")
    return None

```

```

else:
    image = []
    for old_origin_circle in image_old_origin:
        for new_origin_circle in image_new_origin:
            if old_origin_circle.num == new_origin_circle.num:
                image.append(Circle(old_origin_circle.num,
new_origin_circle.origin, new_origin_circle.radius))
    return image

# Функция сортировки координат реперных точек
def image_sort(image, alpha=0.1, reverse=False, Yaxis = False):
    data = []
    for circle in image:
        if Yaxis is True:
            data.append((circle.origin[0] + alpha * circle.origin[1], circle))
        else:
            data.append((alpha * circle.origin[0] + circle.origin[1], circle))
    sort_data = sorted(data, key=lambda circle: circle[0], reverse=reverse)
    out_image = []
    for circle in sort_data:
        out_image.append(circle[1])
    return out_image

# Функция сортировки координат реперных точек с доворотом
def image_sort_with_rotation(image, alpha=0.1, reverse=False, Yaxis = False):
    rot_image = image_rotate(image)
    rot_image_sort = image_sort(rot_image, alpha=alpha, Yaxis = Yaxis)
    out_image = image_change_origin(rot_image_sort, image)
    return out_image

# Функция расчета общей матрицы перехода
def get_transformer_matrix(base_image, dest_image, trans_type = 0):
    if len(base_image) != len(dest_image):
        print(f"Sizes of images are not equal. Base image: {len(base_image)},
Destination image: {len(dest_image)}")
        return 0
    else:
        C = None
        ZX = None
        ZY = None
        if trans_type == 0:
            C = np.zeros((len(base_image), 3))
            Z = np.zeros((len(base_image), 2))
            for i in range(0, len(base_image)):
                C[i][0] = base_image[i].origin[0]
                C[i][1] = base_image[i].origin[1]
                C[i][2] = 1.0
                Z[i][0] = dest_image[i].origin[0]
                Z[i][1] = dest_image[i].origin[1]
            elif trans_type == 1:
                C = np.zeros((len(base_image), 6))
                Z = np.zeros((len(base_image), 2))
                for i in range(0, len(base_image)):
                    C[i][0] = base_image[i].origin[0]**2
                    C[i][1] = base_image[i].origin[1]**2
                    C[i][2] = base_image[i].origin[0]*base_image[i].origin[1]
                    C[i][3] = base_image[i].origin[0]
                    C[i][4] = base_image[i].origin[1]
                    C[i][5] = 1.0
                    Z[i][0] = dest_image[i].origin[0]
                    Z[i][1] = dest_image[i].origin[1]
            else:
                print(f"Unknown trans_type: {trans_type}.")
                return 0

```

```

    OLS = np.dot(np.linalg.inv(np.dot(np.transpose(C), C)), np.dot(np.transpose(C), Z))
    return np.transpose(OLS)

# Функция усреднения координат реперных точек
def avg_image_get(images):
    avg_image = image_zeros(len(images[0]))
    avg_circles_num = [0] * len(images[0])
    for image in images:
        image = circles_equalizer(images[0], image)
        for circle in image:
            avg_image[circle.num].origin[0] += circle.origin[0]
            avg_image[circle.num].origin[1] += circle.origin[1]
            avg_image[circle.num].radius += circle.radius
            avg_circles_num[circle.num] += 1
    for circle in avg_image:
        circle.origin[0] = circle.origin[0] / avg_circles_num[circle.num]
        circle.origin[1] = circle.origin[1] / avg_circles_num[circle.num]
        circle.radius = circle.radius / avg_circles_num[circle.num]
    return avg_image

```

### Модуль «mesh\_combiner.py»

```

from scipy.spatial import Delaunay
import cv2
import numpy as np

def generate_triangular_mesh(vertexes: list, image): # Функция генерации сетки
    np_points = np.array(vertexes)
    mesh = Delaunay(np_points)
    mesh_vertexes = np.array(mesh.points[mesh.simplices], dtype=np.float32)
    return mesh_vertexes

def get_corresponding_point_index(point_pairs: list, point: list): # Функция
сопоставления точек по индексу
    for i in range(len(point_pairs)):
        if (point_pairs[i] == point).all():
            return i
    raise ValueError(f'Не найдена точка: {point}')

def get_triangles_pairs(paired_coordinates: list, vertexes1: list): # Функция
сопоставления треугольников по спискам вершин
    vertexes1 = list(vertexes1)
    pairs = [vertexes1.copy(), []]

    for v in range(len(vertexes1)):
        new_vertexes2 = []
        for p in vertexes1[v]:
            ind = get_corresponding_point_index(paired_coordinates[0], p)
            new_vertexes2.append(paired_coordinates[1][ind])
        pairs[1].append(np.array(new_vertexes2).astype(np.float32))
    return pairs

def transform_image(image_src, image_dst, paired_coordinates: list): #
Преобразование изображения по сетке
    mesh_vertexes1 = generate_triangular_mesh(paired_coordinates[0], image_src)
    mesh_vertexes_pairs = get_triangles_pairs(paired_coordinates, mesh_vertexes1)
    result_image = np.zeros(image_dst.shape, dtype=np.uint8)
    affine_vertexes_template = []
    Error_Vectors_Lengths = []

    for i in range(len(mesh_vertexes_pairs[0])):
        mask = np.zeros(image_src.shape[:2], dtype=np.uint8)

```

```

        cv2.fillConvexPoly(mask,
np.array(mesh_vertexes_pairs[0][i]).astype(np.int32), 255)
        image_src_blacked = cv2.bitwise_and(image_src, image_src, mask=mask)
        matrix = cv2.getAffineTransform(mesh_vertexes_pairs[0][i],
mesh_vertexes_pairs[1][i])
        warped_image = cv2.warpAffine(image_src_blacked, matrix,
image_dst.shape[:2][::-1])
        result_image = cv2.add(result_image, warped_image)
        X0new = mesh_vertexes_pairs[0][i][0][0]*matrix[0][0] +
mesh_vertexes_pairs[0][i][0][1]*matrix[0][1] + matrix[0][2]
        Y0new = mesh_vertexes_pairs[0][i][0][0]*matrix[1][0] +
mesh_vertexes_pairs[0][i][0][1]*matrix[1][1] + matrix[1][2]
        X1new = mesh_vertexes_pairs[0][i][1][0]*matrix[0][0] +
mesh_vertexes_pairs[0][i][1][1]*matrix[0][1] + matrix[0][2]
        Y1new = mesh_vertexes_pairs[0][i][1][0]*matrix[1][0] +
mesh_vertexes_pairs[0][i][1][1]*matrix[1][1] + matrix[1][2]
        X2new = mesh_vertexes_pairs[0][i][2][0]*matrix[0][0] +
mesh_vertexes_pairs[0][i][2][1]*matrix[0][1] + matrix[0][2]
        Y2new = mesh_vertexes_pairs[0][i][2][0]*matrix[1][0] +
mesh_vertexes_pairs[0][i][2][1]*matrix[1][1] + matrix[1][2]
        affine_vertexes_template.append([X0new, Y0new], [X1new, Y1new], [X2new,
Y2new]))
        err_p1 = ((mesh_vertexes_pairs[1][i][0][0] - affine_vertexes_template[i][0
][0]) ** 2 + (mesh_vertexes_pairs[1][i][0][1] - affine_vertexes_template[i][0][1])
** 2) ** 0.5
        err_p2 = ((mesh_vertexes_pairs[1][i][1][0] - affine_vertexes_template[i][1
][0]) ** 2 + (mesh_vertexes_pairs[1][i][1][1] - affine_vertexes_template[i][1][1])
** 2) ** 0.5
        err_p3 = ((mesh_vertexes_pairs[1][i][2][0] - affine_vertexes_template[i][2
][0]) ** 2 + (mesh_vertexes_pairs[1][i][2][1] - affine_vertexes_template[i][2][1])
** 2) ** 0.5
        Error_Vectors_Lengths.append([err_p1, err_p2, err_p3])
    print('\n', "Наибольшее значение ошибки:", '\n',
max(max(Error_Vectors_Lengths)))
    return result_image

```

### Модуль «probability\_estimator.py»

```

import json
import numpy as np
import matplotlib as mpl
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.special import erfinv, erf
import scipy.stats as sps
from scipy import integrate
import math

# Функция чтения параметров из файла
def read_parameters(filename):
    with open(filename) as f:
        parameters = json.load(f)
    return parameters

# Функция нахождения вероятности P_route для i-го слоя печатной платы
def P_route_i(w_tr_d, h, pcb_class, expo_distortion, etch_distortion,
expo_roughness, F):
    k_max = None
    k_min = None
    if pcb_class == 3:
        k_max = 0.2
        k_min = 0.2
    elif pcb_class == 2:
        k_max = 0.3
        k_min = 0.2

```



```

elif pcb_class == 1:
    k_max = 0.3
    k_min = 0.3
    F1_arg = (k_max*w_tr_d-expo_distortion-etch_distortion)/(math.sqrt(2*(pow(expo_roughness,2)+pow(h/F,2))))
    F1 = (1+erf(F1_arg/math.sqrt(2)))/2
    F2_arg = (-k_min*w_tr_d-expo_distortion-etch_distortion)/(math.sqrt(2*(pow(expo_roughness,2)+pow(h/F,2))))
    F2 = (1+erf(F2_arg/math.sqrt(2)))/2
    P_route = F1-F2
    return P_route

# Функция нахождения вероятности P_route для печатной платы
def P_route (pcb_parameters, factory_parameters):
    P_route_list = []
    P_route = 1
    for layer in pcb_parameters["layers"]:
        P_route_layer = P_route_i(layer["w_tr_d_min"], layer["h"],
pcb_parameters["rel_class"], factory_parameters["litography"]["distortion"],
factory_parameters["etching"]["distortion"],
factory_parameters["litography"]["roughness"],
factory_parameters["etching"]["etching_factor"])
        P_route_list.append(P_route_layer)
        P_route = P_route * P_route_layer
    return P_route

# Функция определения конструктивных параметров после процесса травления
def parameters_after_etching(pcb_class, w_tr_d, w_tr_d_min, d_via,
expo_distortion, etch_distortion):
    k_max = None
    k_min = None
    if pcb_class == 3:
        k_max = 0.2
        k_min = 0.2
    elif pcb_class == 2:
        k_max = 0.3
        k_min = 0.2
    elif pcb_class == 1:
        k_max = 0.3
        k_min = 0.3
    w_tr_d_etch = w_tr_d+expo_distortion+etch_distortion
    w_tr_d_min_etch = w_tr_d_min*(1-k_min)
    d_via_etch = d_via - (w_tr_d_min-w_tr_d_min_etch)
    return (w_tr_d_etch, w_tr_d_min_etch, d_via_etch)

# Функция нахождения вероятности P_pad для j-ой контактной площадки печатной платы
def P_pad_i(pcb_class, d_via, d_drill, w_tr_d_list, w_tr_d_min, std_drill_x,
std_drill_y, cor_drill, m_ol_x, std_ol_x, m_ol_y, std_ol_y, cor_ol):
    R_c = None
    if pcb_class == 3:
        R_c = d_via/2 - d_drill/2 - 0.05
    elif pcb_class == 2:
        R_c = math.pow(d_via/2, 2) - math.pow(d_drill/2, 2)/2
        R_c = math.pow(R_c, 0.5) - d_drill/2/math.pow(2, 0.5)
    elif pcb_class == 1:
        R_c = math.pow(d_via/2, 2) - math.pow(d_drill/2, 2)
        R_c = math.pow(R_c, 0.5)
    for trace in w_tr_d_list:
        if trace[1] == 0:
            R_c_min = math.pow(d_via/2, 2)-math.pow(trace[0], 2)/4
            R_c_min = math.pow(R_c_min, 0.5)
            b_c_min = math.pow((d_drill+w_tr_d_min),2) - math.pow(trace[0], 2)
            b_c_min = math.pow(b_c_min, 0.5)/2
            R_c_min = R_c_min-b_c_min

```

```

        if R_c_min < R_c:
            R_c = R_c_min
    m_x = m_ol_x
    m_y = m_ol_y
    std_x = math.pow(math.pow(std_drill_x, 2) + math.pow(std_ol_x, 2), 0.5)
    std_y = math.pow(math.pow(std_drill_y, 2) + math.pow(std_ol_y, 2), 0.5)
    cor = (cor_drill*std_drill_x*std_drill_y+cor_ol*std_ol_x*std_ol_y)/std_x/std_y
    f = lambda x, y: 1/2/3.14/math.pow(1-cor*cor,
0.5)/std_x/std_y*math.exp((-((math.pow((x-m_x),2)/math.pow(std_x,
2))-(2*cor*(x-m_x)*(y-m_y)/std_x/std_y)+(math.pow((y-m_y),2)/math.pow(std_y,
2))))/2/(1-cor*cor))
    high_y = lambda x: math.pow(R_c*R_c-x*x, 0.5)
    low_y = lambda x: -math.pow(R_c*R_c-x*x,0.5)
    high_x = R_c
    low_x = -R_c
    P = integrate.dblquad(f, low_x, high_x, low_y, high_y)
    return P

# Функция нахождения вероятности P_pad для i-го слоя печатной платы
def P_pad (pcb_parameters, factory_parameters):
    P_pad_all = 1
    for layer in pcb_parameters["layers"]:
        for via in layer["vias"]:
            w_tr_d_list = []
            w_tr_d_min_etch = None
            d_via_etch = None
            w_tr_d_list_etch = []
            for conductor in via["conductors"]:
                w_tr_d_list.append((conductor["w_tr_d"],conductor["is_tear"]))
                pae = parameters_after_etching(pcb_parameters["rel_class"],conducto
r["w_tr_d"], layer["w_tr_d_min"], via["d_via"],
factory_parameters["lithography"]["distortion"],
factory_parameters["etching"]["distortion"])
                print(pae)
                w_tr_d_list_etch.append((pae[0], conductor["is_tear"]))
                d_via_etch = pae[2]
                w_tr_d_min_etch = pae[1]
            P_pad_one= P_pad_i(pcb_parameters["rel_class"], d_via_etch,
via["d_drill"], w_tr_d_list_etch, w_tr_d_min_etch,
factory_parameters["drilling"]["std_x"], factory_parameters["drilling"]["std_y"],
factory_parameters["drilling"]["cor"], factory_parameters["overlay"]["m_x"],
factory_parameters["overlay"]["std_x"], factory_parameters["overlay"]["m_y"],
factory_parameters["overlay"]["std_y"], factory_parameters["overlay"]["cor"])
            print(f'{pcb_parameters["rel_class"], d_via_etch, via["d_drill"],
w_tr_d_list_etch, w_tr_d_min_etch, factory_parameters["drilling"]["std_x"],
factory_parameters["drilling"]["std_y"], factory_parameters["drilling"]["cor"],
factory_parameters["overlay"]["m_x"], factory_parameters["overlay"]["std_x"],
factory_parameters["overlay"]["m_y"], factory_parameters["overlay"]["std_y"],
factory_parameters["overlay"]["cor"]}')
            P_pad_all = P_pad_all*P_pad_one
    return P_pad_all[0]

# Функция нахождения вероятности P_pcb печатной платы
def P_pcb(pcb_parameters, factory_parameters):
    P = P_route(pcb_parameters, factory_parameters)*P_pad(pcb_parameters,
factory_parameters)
    print(f"Вероятность выхода печатной платы в соответствии с требованиями приемки
равна: {P}")
    return P

```