

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)»**

На правах рукописи



Фам Вьет Ань

**ДОПУСКОВЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПЕЧАТНЫХ
ПЛАТ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

Специальность 05.12.04

«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Дембицкий Николай Леонидович

Москва - 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И КОНТРОЛЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ	9
1.1. Тенденции развития методов проектирования и производства печатных плат для устройств цифровой обработки информации.....	9
1.2. Анализ методов технологического контроля параметров печатных плат	18
1.3. Методы обеспечения надежности и качества радиотехнических устройств при сборке и монтаже на печатных платах.....	28
1.4. Постановка задач диссертации	36
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ДОПУСКОВЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПП ДЛЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ	39
2.1. Конструктивно-технологические погрешности прецизионных ПП быстродействующих цифровых устройств.....	39
2.2. Исследование аналитических зависимостей волнового сопротивления от конструктивных параметров межсоединений печатных плат быстродействующих узлов цифровой обработки информации	44
2.3. Расчет допусков параметров межсоединений печатных плат быстродействующих узлов цифровой обработки информации	53
2.4. Методика и алгоритм расчета погрешностей волнового сопротивления от разброса геометрических размеров проводников.....	62
Выводы по главе 2	70
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	72
3.1. Разработка способа неразрушающего контроля производственных погрешностей формирования проводников ПП	72
3.2. Разработка стенда контроля ширины проводников ПП	76
3.3. Разработка метода неразрушающего контроля погрешностей совмещения слоев на МПП 81	
Выводы по главе 3	90
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИХ ДОПУСКОВЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ СБОРОЧНО-МОНТАЖНЫХ ОПЕРАЦИЯХ КОМПОНЕНТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	92

4.1. Методы расчета погрешности смещений компонентов при монтаже на поверхности ПП 92	
4.2. Разработка модели совмещения вывода с контактными площадками.....	104
4.3. Разработка программно-алгоритмических средств для прогнозирования вероятности нарушения допусков на установку компонентов на ПП.....	111
4.4. Задача оптимизации размеров монтажных контактных площадок компонентов при конструировании ПП.....	119
Выводы к главе 4	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	134
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ УЗЛОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ.....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПРИМЕР ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛЬ ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛА	156
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТИ КОНСТРУКТИВНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ НА ПОГРЕШНОСТЬ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ	162
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БРАКА ПРИ УСТАНОВКЕ КОМПОНЕНТОВ НА ПЕЧАТНУЮ ПЛАТУ	168

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования:

Печатный узел является важнейшей сборочной единицей электронной аппаратуры, от которой во многом зависит качество функционирования радиотехнического устройства. Поэтому не ослабевает постоянный интерес к исследованиям и разработкам конструкторско-технологических проблем проектирования и производства печатных плат (ПП). В настоящее время при создании ПП на первое место выходят требования к повышению уровня плотности монтажа при безусловном обеспечении надежности, помехозащищенности и электрических параметров платы. Проектирование прецизионных печатных плат следует рассматривать как часть комплексного этапа проектирования печатного узла, при котором только совместное рассмотрение схемотехнических, конструкторских и технологических аспектов позволит достичь успеха, создать работоспособное устройство.

Все более **актуальной становится задача** исследования вопросов влияния технологических факторов на качество и надежность узлов РЭА на ПП. Отклонение параметров технологического процесса от номинальных значений приводит к появлению брака. Еще более нежелательным следствием нарушения технологических норм становятся скрытые дефекты печатных плат, которые обнаруживаются на поздних этапах производства аппаратуры. Такие дефекты приводят к резкому увеличению стоимости изделия. Дефекты нарушения допусков на конструктивно-технологические параметры могут проявляться и в процессе эксплуатации изделия, что снижает его надежность и может приводить к непоправимым последствиям (авариям сложной и дорогостоящей техники).

В настоящее время влияние погрешностей при проектировании быстродействующих цифровых устройств на прецизионных печатных платах определяется эмпирическими методами путем тестирования образцов на производстве. Такой подход приводит к значительному растягиванию времени

проектирования, удорожанию изделий, снижению надежности радиотехнических устройств.

Решение задачи *прогнозирования и контроля погрешностей технологий* прецизионных ПП поможет разработчику узла РЭА адекватно представлять результаты его реализации в производственном процессе, а технологу осуществлять подготовку производства и оперативный контроль качества изготовления изделий.

Целью диссертационной работы является повышение *надежности* радиотехнических устройств методами прогнозирования и оперативного контроля погрешностей конструктивно-технологических параметров на стадиях проектирования и производства прецизионных печатных плат.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются **следующие задачи:**

1. Исследование влияния конструктивно-технологических погрешностей на электрофизические параметры печатных проводников с целью создания допусковых методов прогнозирования и контроля показателей надежности прецизионных печатных плат на этапах их проектирования и производства.

2. Разработка методов прогнозирования вероятности выхода волнового сопротивления печатных проводников узлов РЭА за пределы производственных допусков. Целью разработки является повышение надежности изготовленных узлов РЭА с учетом конструктивных и технологических погрешностей ПП.

3. Создание способов неразрушающего контроля погрешностей производства ПП на основе электро-радиоизмерений параметров проводников, которые позволят упростить и удешевить проверку конструктивно-технологических параметров ПП на соответствие требованиям допусков. Целью разработки являются экономичные способы оперативного контроля прецизионных ПП.

4. Разработка методов для прогнозирования вероятности смещения компонентов при сборке за границы допуска с целью создания алгоритмов и

программ оптимизации конструктивных параметров прецизионных ПП и выбора оборудования сборочно-монтажных производств для изготовления надежных узлов РЭА на прецизионных ПП.

Научная новизна предлагаемого в диссертации подхода состоит в том, что на основе известных положений теории параметрической надежности, расчета и измерения электрофизических параметров линий связи, оценки точности технологических операций предложены методы, математические модели и алгоритмы, позволяющие в отличие от существующего подхода дополнить процесс верификации конструкций радиотехнических устройств прогнозированием и оперативным контролем влияния производственных погрешностей на показатели надежности прецизионных ПП и радиотехнических устройств на их основе.

Признаками научной новизны обладают следующие **положения, выносимые на защиту**:

1. *Методика проектирования ПП*, дополняющая существующий подход к верификации их конструкции прогнозированием возможностей производства при допусковых ограничениях на погрешности волнового сопротивления печатных проводников сигнальных связей.

2. *Способ* неразрушающего контроля погрешности ширины печатных проводников на основе рефлектометрического метода измерения волнового сопротивления, снижающий трудоемкость существующих методов контроля.

3. *Способ* неразрушающего контроля смещения слоев многослойных ПП на основе рефлектометрического метода измерения волнового сопротивления, снижающий трудоемкость и стоимость существующих методов контроля.

4. *Алгоритм* прогнозирования вероятности дефектов установки компонентов на поверхности прецизионных ПП, предоставляющий разработчику узлов РЭА объективные оценки возможностей сборочно-монтажного производства при конструировании посадочных мест компонентов.

5. Алгоритм оптимизации конструкции посадочных мест компонентов с учетом факторов надежности и качества узлов РЭА при монтаже на поверхности, позволяющий находить оптимальное соотношение между требованиями погрешности установки компонентов в пределах допусков и обеспечением максимальной плотности монтажа.

Практическая значимость:

Разработанные в диссертации методы и алгоритмы при проектировании, способы контроля при производстве прецизионных ПП позволяют:

- *разработчикам* узлов РЭА повысить уровень надежности конструкций ПП при постоянном росте плотности монтажа и переходе к 5-7 классам точности ПП за счет дополнения методик проектирования учетом влияния погрешностей производства на вероятность обеспечения заданных допусков на электрические и конструктивные параметры прецизионных ПП;
- повысить уровень надежности конструкций ПП при мелкосерийном и опытном производстве, расширив возможности применения операций контроля конструктивно-технологических параметров ПП за счет предложенных экономичных и эффективных способов неразрушающего контроля, значительно снижающих затраты на внедрение контроля совмещения слоев многослойных печатных плат и в 4-5 раз снижающих трудоемкость контроля по сравнению с разрушающим контролем.

Реализация результатов диссертации:

Разработанные методы, математические модели и алгоритмы внедрены в учебном процессе кафедры 404 и в ОАО «РТИ».

Методология и методы исследований:

Построение параметрической и количественной модели для оценки ухода конструктивно-технологических параметров радиотехнических устройств на ПП за пределы допусков выполняется методами теории параметрической надежности и точности. Разработка технологических способов неразрушающего контроля качества ПП выполняется с применением метода рефлектометрии

высокочастотных линий связи. Для разработки математической модели задачи оптимизации используется теория математического программирования. Исследования адекватности предлагаемых в диссертации методов, моделей и алгоритмов выполнялись моделированием на промышленной САПР, проверкой полученных результатов на примере конструирования узла РЭА, разработкой специального программного обеспечения, реализующего предложенные методы и алгоритмы.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- Проверкой точности предложенных математических моделей сравнением с результатами расчетов, полученными с помощью промышленной автоматизированной системы моделирования СВЧ устройств.
- Программной реализацией разработанных математических методов, моделей и алгоритмов.
- Проверкой разработанных моделей и методов на примерах.

Апробация работы:

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались на 5 научных конференциях.

Публикации:

Основные результаты работы опубликованы в 13 печатных работах, в том числе 5 в журналах из списка ВАК, 5 в сборниках тезисов докладов, а также в 3 заявках на изобретения.

Личный вклад автора: Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Она содержит 175 страниц машинописного текста, включающего 54 рисунка, список литературы из 105 наименований, и 4 приложения.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И КОНТРОЛЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

1.1. Тенденции развития методов проектирования и производства печатных плат для устройств цифровой обработки информации

Появление нового радиоэлектронного устройства сложный и порой противоречивый процесс, основанный на широчайшем спектре физических, химических и иных явлений и связанный с рисками превышения выделенных ресурсов и срыва графиков выполнения работ [31]. Повышение технических и эксплуатационных характеристик устройств радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) играет определяющую роль в повышении эффективности современной техники. При этом на первый план выходят наряду с функциональными параметрами массогабаритные показатели и надежность, которые закладываются в изделие на стадиях конструирования и производства [83].

Печатная плата (ПП) является основой построения конструкций большинства видов современной РЭА. Поэтому совершенствование технологий производства узлов РЭА на ПП по-прежнему остается одним из важнейших направлений практической радиотехники, а разработка новых методов улучшения их качества всегда востребовано радиопромышленностью и весьма актуальна.

Снижение уровня дезинтеграции является общей тенденцией развития радиоэлектроники. Очевидно, что степени интеграции и дезинтеграции должны соответствовать техническому уровню развития производства. При стремлении выполнить конструкцию на предельных возможностях производства стоимость изделия станет неоправданно высокой из-за большого объема отходов на брак. Надежность таких конструкций тоже не будет гарантирована. Производство же изделий, спроектированное по низким проектным нормам, приводящим к большой степени дезинтеграции, приведет к большой материалоемкости, низкой фондоотдаче, снижению показателей качества.

Главным стимулом повышения интеграции РЭА является постоянное развитие элементной базы — увеличение интеграции микросхем и общее увеличение плотности компоновки элементов и устройств электронной аппаратуры. Основными направлениями решения этой задачи являются: минимизация размеров компонентов; увеличение количества и плотности выводов микросхем; увеличение плотности размещения компонентов на ПП.

Минимизация размеров компонентов вызвана, в первую очередь, стремлением к снижению массогабаритных характеристик изделий. Это актуально для всех классов радиоэлектронной аппаратуры, особенно для спецтехники.

Непрерывный рост плотности монтажа и уменьшение размеров компонентов предъявляют повышенные требования к качеству технологического процесса (ТП) [58]. Освоение плотной компоновки элементов должно сопровождаться развитием производства печатных плат для обеспечения соответствующей плотности межсоединений. Технологии печатных плат вынужденно поддерживают общее стремление к миниатюризации путем роста плотности межсоединений в платах за счет использования многослойных структур и уменьшения проектных норм.

Ужесточение конструктивно-технологических требований к печатному монтажу особенно характерно для цифровой техники, поскольку на фоне увеличения быстродействия элементной базы производительность устройств в значительной степени может зависеть от длины связей между компонентами на ПП из-за конструктивной задержки передаваемого сигнала [58]. Главной составляющей временных задержек в современных и перспективных электронных устройствах являются задержки сигналов в линиях связи (6–7 нс/м). Поэтому повышение быстродействия логических элементов должно сопровождаться максимально возможным снижением задержек в межсоединениях. Для достижения требуемых показателей быстродействия требуется добиваться

увеличения плотности межсоединений и за счет этого уменьшения длины линий связи.

Повысить плотность межсоединений и монтажа компонентов на печатных платах можно следующими способами [58]:

- уменьшением размера отверстий и контактных площадок для расширения трассировочного пространства;
- увеличением количества трасс между отверстиями за счет уменьшения ширины проводников и зазоров (уменьшения шага трасс проводников);
- введением многоуровневых межсоединений;
- отказ от сквозных отверстий в пользу глухих и слепых межслойных переходов;
- увеличением количества слоев.

Как отмечено в [58] преградой увеличения плотности за счет добавления дополнительных слоев МПП является существенное возрастание стоимости производства. Поэтому наиболее перспективным направлением развития технологий ПП остается снижение проектных норм на размеры межсоединений.

Тенденции развития радиоаппаратуры связаны с все большим использованием ПП, изготовленных с минимальными геометрическими размерами проводников и контактных площадок, применением ПП 5-ого класса точности и выше (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Наименьшие номинальные значения размеров для класса точности [19]

В миллиметрах

Наименование параметра	Наименьшие номинальные значения размеров для класса точности						
	1	2	3	4	5	6	7
Ширина проводника	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,050
Расстояние между проводниками	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,050

	Наименьшие номинальные значения размеров для класса точности						
Гарантийный поясок контактной площадки	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025	0,020	0,015

Достижения в области технологии дают основания для оптимистических прогнозов в повышении уровня интеграции, снижения трудоемкости изготовления, повышения качества и надежности конструкций радиотехнических устройств на ПП.

Наряду с перспективами повышения интеграции происходит постоянный рост сложности узлов на ПП, переход на более высокие частоты, повышение быстродействия цифровых схем. Развитие цифровых систем сопровождается уменьшением размеров компонентов, увеличением интеграции устройств и плотности монтажа на ПП.

Наряду с улучшением схмотехнических и конструктивных характеристик устройств переход к ПП высоким классам точности сопряжен с возрастанием стоимости организации производства, повышением рисков возникновения брака и снижением надежности. Необходимость преодоления негативных факторов при создании и использовании новых прецизионных ПП ставит перед проектировщиками радиотехнических устройств комплексные задачи, решение которых находится на стыке схмотехники, конструирования и технологии.

Повышению быстродействия цифровых устройств способствует применение новых конструкторско-технологических направлений, а именно - современных конструкций корпусов интегральных микросхем, увеличение числа выводов на один корпус, применение технологии монтажа на поверхность и миниатюризации компонентов [47]. Больше половины современных устройств на ПП работают в диапазонах частот, превышающих 50-100 МГц, когда становятся актуальными учет волновых свойств межсоединений. Например, для систем телекоммуникаций, где требования к быстродействию особенно высоки, цифровые системы должны работать с сигналами, фронты которых составляют

доли наносекунд, что соответствует частотам в сотни и тысячи мегагерц [90] [91] [92] [98].

При существующем уровне развития радиотехники показатели надежности печатной платы для быстродействующих цифровых устройств обработки сигналов определяются соответствием электродинамических характеристик конструкции устройства заданным параметрам быстродействия, а свойства межсоединений компонентов на ПП оказывают значительное влияние на работоспособность схемы [79]. Поэтому среди множества проблем, связанных с производством прецизионных ПП для высокоскоростной цифровой обработки, наибольшее внимание приходится уделять межсоединениям. Очевидно, что, когда быстродействие системы возрастает, межсоединения, а, следовательно, компоновка элементов и печатных плат становятся узким местом, замедляющим работу системы. Задержка в межсоединениях системы может составлять до 55% [15].

В устройствах, работающих на тактовых частотах более сотни мегагерц, амплитуда сигнала проблема целостности сигнала становится существенной, если выдерживается следующее численное неравенство:

$$l \geq 25 \cdot t_r, \quad (1.1)$$

в котором l - длина линии передачи, мм, а t_r - длительность фронта цифрового сигнала, нс. Это означает, что при фронте сигнала менее 1 нс, проблема целостности сигнала возникает при длине линии передачи менее 25 мм [47]. Для большинства ПП средняя длина сигнальных соединений заведомо больше. Поэтому в быстродействующих цифровых устройствах на ПП проводники следует рассматривать, как электрически длинные линии.

При прохождении сигналов проводники печатной платы ведут себя как низкочастотные фильтры, внося искажения в форму и увеличивая длительность фронтов, нарушая *целостность сигналов*. Основные причины нарушения целостности сигналов связаны с временными задержками, вносимыми линиями передачи; несинхронность фронтов импульсов; отсутствие согласования линий

передачи и их нагрузок; перекрёстные помехи (наводки); переходные процессы при переключении напряжения между логическими уровнями.

Под обеспечением *целостности сигналов* в ПП понимается создание такой топологии, при которой вносимые в форму сигналов искажения не нарушают функционирование устройства. Проблема обеспечения целостности сигналов (ЦС), предполагающая анализ причин их искажения и разработку методов устранения, играет существенную роль при проектировании вычислительной техники. За последние годы в связи с резким ростом производительности микропроцессоров и вычислительных комплексов, обусловившим переход на сигналы субнаносекундного диапазона, целостность сигналов приобрела ключевое значение и стала предметом ряда основательных исследований и связанных с ними публикаций по ПП [2] [5] [10] [39] [47] [72] [72] [98] [100].

В настоящее время технические и эксплуатационные характеристики высокопроизводительных вычислительных систем во многом определяются конструкцией межсхемных соединений и технологией их получения. В результате отсутствия согласования линий связи с нагрузками возникают отражения сигналов. Отражения могут вызвать отрицательные и положительные выбросы, внося существенные искажения и изменяя характеристики информационных и тактовых сигналов, а, в самом неблагоприятном случае, возможно повреждение приемника или самого драйвера.

Отражения, вызванные несоответствием выходного и входного импеданса, возникают при не вполне корректном согласовании. Наиболее значительно отражения проявляются при передаче высокоскоростных сигналов с быстрыми фронтами. Отраженный импульс накладывается на основной сигнал, ухудшая его форму. Влияние оказывается также и на фронты тактового сигнала, добавляя неопределенность к времени задержки – фазовый шум Δt .

При разводке высокочастотных печатных плат следует уделять внимание задержкам сигналов в печатных проводниках. Рассинхронизация сигналов может привести к сбоям или полной неработоспособности устройства.

На практике необходимо обеспечить равные задержки на пути от источника сигнала к приемнику для некоторой группы сигналов. Для выравнивания задержек конструкторы применяют различные приемы. Регулирование задержек сигналов осуществляется в основном за счет изменения длин проводников [72].

Однако для выравнивания задержек недостаточно просто протянуть линии передачи одинаковой длины ко всем точкам схемы. На пути печатного проводника встречаются различные неоднородности, которые вносят вклад в искажение формы фронтов сигнала, приносят дополнительные задержки [47]. Неоднородности в виде поворотов, переходов со слоя на слой, паразитных параметров компонентов неизбежны. Это создает дополнительные проблемы для разработчика ПП.

Необходимость максимального использования скоростных свойств логических элементов субнаносекундного диапазона вынуждает разработчиков постоянно совершенствовать методы автоматизированного проектирования и оптимизации построения вычислительных средств для обеспечения целостности и высоких характеристик передаваемых сигналов.

Основные задачи обеспечения целостности сигналов можно описать, используя понятие полного сопротивления. Полное сопротивление — это тот фактор, который помогает объединить физические и электрические параметры при проектировании печатных плат [47]. Стратегия проектирования заключается в необходимости обеспечить выполнение требований к значению полного сопротивления и осуществления его реализации в конструкции платы.

При моделировании печатных соединений однородными линиями связи переходят к другой характеристике межсоединений - волновому сопротивлению (BC). Волновое сопротивление оказывает определяющее влияние на характеристики целостности сигналов в длинных линиях связи [39].

Чтобы в максимальной степени использовать возможности высокой плотности и скорости переключения соединений внутри электронного элемента, проектирование и изготовление изделий необходимо вести с учетом

электромагнитных явлений, сопровождающих прохождение сигнала. Печатные платы с *контролируемым волновым сопротивлением* - это составная часть указанной концепции [2] [5]. Поэтому ПП для цифровых быстродействующих цифровых устройств часто называют изделиями с контролируемым в процессе проектирования и производства волновым сопротивлением [2] [15].

В этих условиях наблюдается переход от известных ранее методов проектирования и контроля производства узлов РЭА на ПП к новым подходам. В применяемых ранее методах гарантией успешной разработки ПП являлись «интеллектуальные» алгоритмы и средства разработки, целью которых было «правильное» (соответствующее принципиальной схеме) соединение контактов компонентов. САПР ПП ориентировались на формализованные правила синтеза соединений, соблюдение норм проектирования, эффективные алгоритмы оптимизации [1] [69]. Новые требования к быстродействию устройств на ПП, повышение тактовых частот делают известные ранее методы и алгоритмы непригодными, т.к. работоспособность спроектированных с их помощью устройств, определяется не только соответствием соединений принципиальной схеме, но и условиями, накладываемыми разработчиками схем на значения электрических и электромагнитных параметров.

Успешный выход на производство изделий в настоящее время определяет этап верификации проекта с использованием виртуального прототипа [47], под которым понимается установление работоспособности технического средства на его возможно полной модели (виртуальном прототипе) с использованием программных средств. Для быстродействующих плат это практически, единственный способ проверить качество работы проектируемого узла до выполнения физической модели и внести соответствующие коррективы, если они необходимы. Без применения средств моделирования в высокочастотных диапазонах получить работоспособный узел на ПП невозможно.

Основная цель моделирования топологии МПП – выявить проблемы, нарушающие целостность сигналов и электромагнитную совместимость (ЭМС)

устройства. В настоящее время существует ряд САПР, выполняющих данную функцию. Среди них *HyperLynx 8.0* компании *Mentor Graphics*, которая имеет два отдельных инструмента моделирования (с применением *IBIS*-моделей): *LineSim* и *BoardSim* (первый предназначен для предтопологического моделирования, а второй – для посттопологического) [79].

Одной из важных задач моделирования является анализ временного отклика в несогласованных линиях передачи, искажение сигнала в которых может привести некорректному поведению радиоэлектронного оборудования [6].

Теоретическим основам и вычислительным моделям проектирования ПП с контролируемым ВС посвящено большое количество публикаций, среди них можно выделить работы зарубежных авторов (*A.R. Djordjevic* [97], *M.S. Nakhla* [89] и др.), а также российских ученых (*Л.Н. Кечиев* [49], *Н.Д. Малютин* [55], *Т.Р. Газизов* [10] и др.).

Для обеспечения устойчивой работы электронных устройств надо соблюдать правила проектирования. Правила проектирования высокоскоростных линий передачи в многослойных печатных платах разработаны и представлены в стандартах [15] [100]. Разработаны САПР, специализированные для проектирования высокоскоростных многослойных печатных плат, например, *Mentor Graphics Expedition – PCB* [68]. Все это позволяет говорить о прогрессе в методологии проектирования ПП, новых возможностях создания на их основе изделий, удовлетворяющих требованиям современной техники.

В тоже время еще существует разрыв между методами проектирования и возможностями технологий прецизионных ПП. Получение высококачественных опытных образцов и макетов устройств на ПП еще не дает гарантии, что их серийное производство обеспечит необходимый уровень надежности изделий. Не редкость, что при анализе причин неправильного функционирования модулей выявляется, что заданное волновое сопротивление не было обеспечено при производстве печатной платы. Как отмечается в [2], неработоспособность модуля, как правило, в таких случаях неисправима.

В условиях постоянного уменьшения технологических норм на топологические элементы ПП (проводники и контактные площадки) все острее встают вопросы точности производства и параметрической надежности печатных соединений, под которыми будем в дальнейшем понимать отклонение значений параметров печатных проводников от допустимых значений. Производственный процесс может оказать определяющее влияние на эти показатели надежности, нарушив целостность сигналов даже в случае идеальной отработки конструкции опытного образца. Параметрические отказы, причинами которых является погрешности производства, наиболее опасны (особенно для спец. техники), т.к. их контроль достаточно сложен, обнаружение в ходе испытаний не гарантировано, а проявиться они могут только в период эксплуатации изделия.

Как показывает проведенный выше анализ, вопросы расчета точности и допускового контроля производства ПП при нынешнем состоянии техники требуют пристального внимания и глубоких исследований. Поэтому, продолжение исследований расчетов и прогнозирования точности создания прецизионных ПП для быстродействующих цифровых радиотехнических устройств обработки сигналов, остается актуальной и требующей своего решения задачей.

1.2. Анализ методов технологического контроля параметров печатных плат

Изготовление устройств на ПП является сложным многошаговым процессом, который часто разбивается на несколько отдельных производств (материалы, компоненты для ПП, печатные платы, сборочно-монтажные производства). Каждое производство характеризуется большим количеством рисков нарушения качества изделия. Как отмечается в ряде работ [11] [66], ранняя отбраковка некачественных изделий приводит к резкому сокращению стоимости и трудоемкости устранения брака на последующих шагах технологического процесса. Производство ПП во многом определяет качество

изготовления радиотехнических устройств. Причем технологии изготовления ПП вносят ощутимый вклад в надежность конечного изделия. Поэтому вопросам контроля качества на выходе технологического процесса (ТП) изготовления ПП уделяется повышенное внимание.

Важнейшим аспектом обеспечения показателей надежности является контроль стабильности конструктивных параметров ПП в пределах допусков. Примером влияния погрешностей конструктивно-технологических параметров является приведенный в [78] анализ влияния производственных погрешностей толщины и диэлектрической проницаемости диэлектрика ПП, ширины и толщины проводников на значение волнового сопротивления для печатных проводников в МПП. Типовой материал FR4, предназначенный для изготовления печатных плат, имеет значение диэлектрической постоянной (ϵ_r) около 4,7 на частоте 1 МГц, которое линейно уменьшается с ростом частоты примерно до 4,2 на 1 ГГц. Реальные значения ϵ_r могут колебаться в пределах $\pm 25\%$. Улучшенные диэлектрики имеют разброс по толщине не более 10%. Ширина проводников на уровне 3σ изменяется в пределах ± 20 мкм. По мере удаления от центра наблюдалось смещение среднего значения в сторону увеличения примерно на 20 мкм. Приведенные данные свидетельствуют о значительных отклонениях конструктивных параметров от номиналов. В условиях повышенных требований к производству прецизионных ПП становится актуальным обязательный контроль стабильности параметров ПП с целью снижения рисков высокого уровня бракованных и ненадежных изделий на выходе производства радиотехнических устройств.

Оборудование для тестирования изделий – это эффективное средство обеспечения качества. При выборе методов и средств контроля изделий исходят из нескольких условий: требования к уровню качества и надежности выпускаемой продукции, стоимость контрольных операций, производительность ТП при использовании операций контроля. Разумное сочетание выполнения

перечисленных требований позволяет обеспечивать выпуск надежной продукции без повышений ее стоимости.

В производстве устройств на ПП одним из самых действенных способов обеспечения высокой надежности становится проведение детальной диагностики компонентов и режимов работы собранной схемы. Автоматизированное измерение параметров установленных на ПП пассивных компонентов может выполняться еще до подачи напряжения на плату. При поданном питании проверяется как соответствие параметров отдельных микросхем, так и функциональное соответствие устройства в целом [11] [48] [64] [66].

Контроль брака - необходимый этап на стадии выпуска готовой продукции - не является самым дешевым способом борьбы за качество изделия. Обнаружение неисправностей после монтажа требует значительных затрат на ремонт или выбраковку, когда на производство уже потрачены значительные ресурсы. Это приводит к значительному удорожанию выпускаемой продукции и снижению ее качества. Правило «десяти» гласит - цена поиска и устранения дефекта увеличивается в 10 раз с каждым новым этапом производства.

Большой процент неисправностей радиоустройств определяется некачественным изготовлением ПП [45] [57] [67]. Сложный процесс производства ПП связан с высокой вероятностью появления как явного брака в виде нарушения проводящих соединений, так и скрытых дефектов в виде отклонения параметров от проектных норм. При этом *нарушение проектных норм* наиболее распространенный и трудно контролируемый фактор снижения качества.

Во многих работах отмечается, что учет технологических погрешностей требует эффективных решений при производстве ПП [56] [63] [82]. Вопросы контроля в процессе производства ПП с учетом их конструктивно-технологической сложности становятся все более актуальными.

Одним из наиболее сложных технологических процессов для создания прецизионных ПП остается процесс травления меди. Принципиальный недостаток абсолютно всех технологий травления заключается в том, что

травление идет не только в желаемом направлении (по направлению к поверхности диэлектрика), но и в поперечном направлении [52] [77] [88]. Причиной появления подтравов является неодинаковая скорость травления в глубину и в стороны (рисунок 1.1).

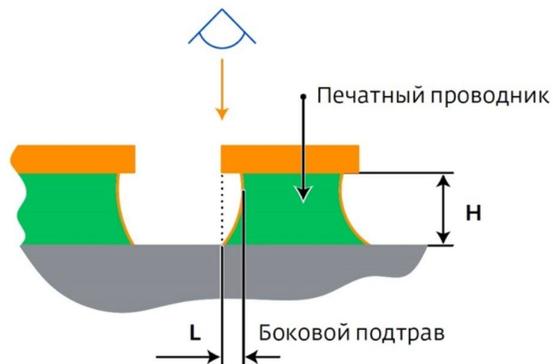


Рисунок 1.1 - Образование боковых подтравов

Боковое подтравливание является важным показателем процесса травления и приобретает тем большее значение, чем более узкие проводники необходимо выполнять на плате [52]. Т.е. при переходе к прецизионным технологиям ПП значимость погрешностей из-за подтравов значительно возрастает.

В процессе травления существенное влияние, затрудняющее формирование прецизионного рисунка, оказывают следующие факторы [52]:

- затрудненный отвод отработанного раствора с верхней поверхности заготовки - «эффект лужи»;
- затрудненный отвод отработанного раствора в местах параллельно идущих проводников с малым зазором «эффект шлейфа»;
- разнотолщинность гальванической меди по площади заготовки (краевой эффект гальванической металлизации);
- малое значение фактора травления.

В областях с широкими зазорами поток травителя может легко проникать в полость зазора и обеспечивать эффективное травление. На участках же с узкими зазорами массоперенос затруднен и значительно снижена скорость травления, что особенно важно для прецизионных плат. Именно поэтому все факторы, влияющие

на интенсификацию процесса подачи травильного раствора в зону травления, определяют качество травления. Предельные возможности контролируемого процесса травления достигаются при приближении ширины зазоров к 75–50 мкм, в зависимости от толщин меди и резиста [80]. Анализ данных технической литературы [52] показывает, что факторы воздействия на процесс травления имеют случайный характер, а их изменение требует постоянного контроля со стороны производителя ПП.

В зарубежной практике принято оценивать качество травления с помощью показателя, который называется *фактор травления*:

$$\Phi = \frac{2(F + G)}{D - d}, \quad (1.2)$$

где Φ – фактор травления; F – толщина фольги; G – толщина гальванической меди; D – размер проводника на диэлектрике; d – размер проводника на поверхности.

На фактор травления влияют:

- химические свойства раствора и режимы процесса;
- конструкция оборудования.

Подтравливание происходит неизбежно во время этого процесса и зависит от параметров травильного раствора, расстояния между проводниками, областью расположения печатных проводников на плате. Равномерность же травления, или равномерность величины фактора подтравливания, зависит главным образом от параметров оборудования [76].

Для обеспечения стабильности процесса травления ПП применяется сложное технологическое оборудование [52], которое позволяет контролировать состав раствора, управлять его распределением и обменом по поверхности ПП. Контроль влияющих факторов повышает стабильность процесса травления. Однако для гарантированного качества проводников требуется дополнить процедуры контроля измерениями параметров их сечений.

Операции контроля ширины проводников является важной составляющей определения качества выполнения операций травления проводников ПП. Для ее осуществления, как правило, применяются методы разрушающего контроля и рентгеновской томографии, которые обеспечивают надежное определение погрешностей травления. Наиболее точный контроль бокового подтравливания - это разрушающий контроль по шлифам. Однако такой контроль не позволяет оперативно отслеживать изменения размеров подтравов.

Компания *Conductor Analysis Technologies (CAT)* [52] использует тестовый шаблон, позволяющий измерять электрическое сопротивление стравленного проводника и, исходя из известной длины линии и толщины меди, рассчитывать ширину проводника. Шаблоны требуют чрезвычайно точного травления для получения хороших результатов, они также очень чувствительны к любым изменениям в процессе травления. Тестовый шаблон, состоящий из модулей, представляет собой заготовку размерами 457 - 610 мм. Шаблон состоит из сетки модулей 16 на 22 шт. (всего 352 модуля), причем каждый модуль повернут на 90°.

Модуль имеет четыре проводника различной ширины и три различных расстояния между ними. Диапазон ширины варьируется от 25–100 мкм (проводник) и 25–75 мкм (зазор) и до 200–275 мкм (проводник) и 200–255 мкм (зазор). Модуль представляет собой квадрат со стороной примерно 25 мм, а длина каждого проводника составляет около 63,5 см.

Тестовые шаблоны можно использовать для аттестации производств. Однако применение таких тестовых шаблонов не приемлемо для небольших, мелкосерийных производств ПП, т.к. требует специализированного оборудования и затрат на приобретение тестовых плат. *Для таких производств возникает необходимость разработки более дешевых и простых методов оперативного контроля качества технологического процесса травления.*

В настоящий момент производить многослойные печатные платы высокого класса точности достаточно дорого. При этом надежность таких плат резко снижается в первую очередь из-за некачественного совмещения элементов

межсоединений в многослойных структурах [63]. Вследствие этого недостатки конструкции и параметров технологических процессов приходится компенсировать использованием дорогостоящих материалов и мириться с высоким процентом брака при производстве печатных плат высокого класса точности.

Одной из основных причин отказов межслойных переходов является ошибки совмещения центров контактных площадок металлизированных отверстий. Снижение качества сквозных и глухих металлизированных отверстий может привести к отказам МПП, как в процессе производства, так и при эксплуатации узлов РЭА.

Высокая плотность межсоединений при проектировании МПП достигается увеличением числа слоев металлизации и уменьшением диаметра контактных площадок. Это приводит к проблеме формирования надежных межслойных связей.

Согласно стандарту IPC-6012В [101] надежность ПП связана с выходом переходного отверстия за границы гарантированного пояска контактной площадки. Например, для авиационной и космической техники выход края отверстия за границы недопустим. Для прецизионных ПП точность технологии формирования топологии слоя составляет до $\pm 0,02-0,015$ мм при ширине проводников $0,1-0,075$ мм (соответствует 6-му классу точности), погрешность сверления составляет $\pm 0,075-0,08$ мм, погрешность диаметра отверстия - также $\pm 0,075-0,08$ мм [86]. Отсюда можно сделать вывод, что для гарантированного с высокой вероятностью качества, межслойного соединения необходимо формировать поясок вокруг отверстия не менее 150-160 мкм.

Чем больше слоев в плате, тем больше должен быть поясок металлизации. Однако, как отмечается в работе [58], при увеличении ширины гарантийного пояска значительно снижаются трассировочные возможности ПП и плотность межсоединений. Поэтому конструкторы ПП стараются работать с предельно малыми размерами гарантийного пояска.

Наличие слепых (глухих) и погребенных (скрытых) отверстий требует нескольких поэтапных прессонок платы, что дополнительно увеличивает погрешность совмещения слоев. Поэтому для плат со слепыми и погребенными отверстиями площадки сквозных металлизированных отверстий (и соответственно пояски металлизации) должны быть сравнительно больше, чем допустимо для простых плат. Рекомендуется делать поясок металлизации не менее 0,127 мм (5 mil) для МПП только со сквозными отверстиями и не менее 0,15 мм для плат со слепыми/погребенными отверстиями.

Установлено [102], что уменьшение диаметра контактных площадок, например от 1,4 до 0,65 мм (на 55%), увеличивает протяженности печатных проводников на единице площади платы вдвое. Следовательно, для получения высокой плотности компоновки устройств необходимо уменьшать размеры контактных площадок. В тоже время уменьшение размеров контактных площадок, как показано в работах [45] [62] приводит к проблеме совмещения слоев МПП. Стремление повысить плотность межсоединений приводит к противоречию с требованиями надежности ПП.

В работах Можарова В.А. [62] проведено исследование, которое показывает, что процессе производства МПП изменение размеров пакета при прессовании дает наибольшие расхождения и, как следствие, имеет приоритетное влияние на выход годной продукции. Уход координат проводников и контактных площадок измеряется десятками и даже сотнями микрон. Основная потеря точности совмещения слоев происходит на этапе прессования. Это приводит к высокому проценту брака по рассовмещению [63].

В работе [63] отмечается, что обеспечить качество совмещения слоев МПП при высокой плотности межсоединений очень сложно. Полностью избежать погрешностей совмещения невозможно, поэтому для прецизионных МПП применяются методы контроля совмещения. Контроль совмещения слоев МПП является сложным и дорогостоящим процессом, который требует, как показывает

анализ существующих в настоящее время методов, применения специального оборудования и сложной технологической оснастки.

При завершении цикла производства МПП целесообразно провести необходимые измерения и получить фактические данные о качестве совмещения слоев. В настоящее время существует ряд методик сбора фактической информации, разрушающих и не разрушающих готовое изделие: послойное вскрытие МПП с последующим замером фактического местоположения реперных знаков и работа с цифровыми образцами, полученными в рентгеновском излучении.

Альтернативная неразрушающая методика основана на создании специальных тестовых купонов по углам групповой заготовки на всех слоях МПП [63]. После прохождения всех этапов технологического процесса к этим купонам на внешних слоях заготовки прикладывается специальный зонд, мгновенно считывающий информацию с них и записывающий ее в память ПК. Операция повторяется для всех купонов на заготовке. Установка позволяет тестировать до 50 слоев в одной заготовке МПП и никоим образом не зависит ни от размера заготовки, ни от ее конструкции, ни от материалов, а, следовательно, особенно удобна для современного многономенклатурного производства. На основе данных, полученных с купонов, составляется карта ошибок совмещения, они группируются по видовым признакам, внутренние слои и их взаимное расположение визуализируются, указывается значение, характер и место возникновения максимальной ошибки совмещения.

Среди предлагаемых способов контроля слоев печатных плат был зарегистрирован патент видеоконтроля слоев печатных плат [71]. Сущность изобретения: формирование изображения происходит о рассеянном внутри подложки свете. В систему видеоконтроля слоев ПП, в которой формирование оптического изображения происходит с использованием света, рассеянного внутри подложки, введена считывающая головка со светоизолирующими перегородками, перемещающаяся над контролируемой поверхностью слоя МПП

на воздушной подушке. Устройство содержит координатный стол. Сформированное оптическое изображение поверхности контролируемого слоя преобразуют в цифровой вид и обрабатывают оцифрованное изображение по определенному алгоритму контроля с целью выявления дефектов.

В работе [95] рассмотрена автоматизированная рентгеновская система машинного зрения для контроля совмещения слоя к слою многослойных печатных плат. На основе методов обработки рентгеновских изображений, был создан автоматизированный процесс контроля отклонения. Система предназначена для контроля трех критических режимов: расширение, сжатие и смещение слоев. Экспериментальные результаты показывают, что разработанная рентгеновская система машинного зрения, в сочетании с автоматизированным процессом инспекции отклонения дает возможность тотального контроля перечисленных параметров для МПП, содержащих до 10 слоев.

Вышла из стадии разработки и комбинированная технология: точный замер местоположения реперных знаков с помощью рентгеновского микрофокусированного излучения и многовариантная оптимизация программы сверления на основании фактических данных об ошибке совмещения.

Недостатками всех перечисленных методов неразрушающего контроля смещения слоев является их высокая техническая сложность и стоимость. Системы разрушающего контроля значительно снижают производительность процесса производства ПП.

Оборудование для наиболее эффективного рентгеноскопического метода стоит значительных средств и применять ее для производства ПП могут позволить только очень крупные фирмы. Для менее крупных компаний данная технология недоступна. В тоже время прецизионные МПП все более востребованы. Поэтому появилась необходимость в создании более простых и дешевых подходов к решению вопроса контроля МПП, которые применимы в условиях мелкосерийного и опытного производства на небольших предприятиях.

Для решения вопросов выполнения проектных норм производства ПП и повышения надежности прецизионных МПП, обеспечения электромагнитных параметров межсоединений компонентов устройств необходимы методы неразрушающего контроля геометрии проводников и совмещения слоев МПП. В диссертации поставлена задача создания таких методов неразрушающего контроля, которые обеспечивают снижение стоимости, повышение производительности контрольных операций при условии допустимой точности контрольных операций.

1.3. Методы обеспечения надежности и качества радиотехнических устройств при сборке и монтаже на печатных платах

Главной тенденцией развития элементной базы для монтажа на ПП является безостановочный курс на миниатюризацию, который ставит для электронной промышленности все новые и новые задачи [43] [61]. Развитие микросхемных компонентов постоянно идет в направлении увеличения интеграции, производительности и функциональности. Процесс характеризуется увеличением плотности активных элементов на кристалле примерно на 75% в год, а это, в свою очередь, вызывает необходимость в увеличении количества их выводов на корпусе на 40% в год [61]. Количество выводов микросхем подчиняется динамике согласно правиле Рента: $n = k \cdot N^R$ (1.3), где n – количество выводов микросхемы; k – среднее число межсоединений, приходящихся на один логический элемент микросхемы ($k = 3 \dots 4$); N – количество логических элементов; R – соотношение Рента (например, для процессоров $R = 0,5 \dots 0,74$).

Борьба за снижение уровня дезинтеграции устройств ПП идет так же интенсивно, как и за увеличение интеграции микросхем [59]. Основное средство решения этой задачи для активных компонентов - использование поверхностно монтируемых элементов: «чиповых» резисторов и конденсаторов, миниатюрных корпусов интегральных микросхем (ИМС), пластмассовых и керамических кристаллоносителей и др., что позволяет отказаться от плат с

металлизированными отверстиями, упростить установку элементов и повысить надежность электронных блоков. Использование компонентов для поверхностного монтажа (SMD - *Surface-Mount Device*) имеет преимущества с точки зрения схемотехнических параметров. Плотность компонентов возрастает, что сокращает время распространения сигналов между ними. Для высокочастотных схем этот фактор, в комбинации с отсутствием выводов, действующих как антенны, делает разработку схем намного проще [43].

Применение технологии поверхностного монтажа (SMT - *Surface Mounting Technology*) дает значительные конструктивные и технологические преимущества: повышение плотности компоновки элементов в 4–6 раз; снижение массогабаритных показателей в 3–5 раз; повышение быстродействия и помехозащищенности за счет отсутствия выводов компонентов; повышение виброустойчивости и вибропрочности модулей; повышение надежности ПП за счет уменьшения количества металлизированных отверстий, являющихся потенциальным источником дефектов; автоматизация сборки, монтажа элементов и повышение производительности труда в десятки раз; исключение операций подготовки выводов и соответствующего оборудования; сокращение производственных площадей на 50%; уменьшение затрат на материалы [51] [67].

Вместе с тем переход к SMT-технологиям приводит к ужесточению условий выполнения сборочно-монтажные операции. Это связано с применением элементной базе на основе использования микроминиатюрных компонентов, с увеличением количества выводов ИМС, с уменьшением расстояния между соседними выводами [60]. Переход от компонентов с периферийными выводами к матричной компоновке выводов позволяет на порядки снизить степень дезинтеграции. Однако за повышение интеграции аппаратуры приводит к значительным технологическим проблемам на этапе сборки узлов на ПП. Сложение погрешностей автоматов укладчиков, изготовления ПП, смещения выводов компонентов SMT относительно корпуса может привести к суммарной погрешности позиционирования установки компонента автоматом в пределах 0,2-

0,3 мм [51]. При шаге выводов менее 1 мм такое смещение может стать причиной брака или снижения надежности пайки. В статье [38] отмечается, что некоторые бескорпусные микросхемы и компоненты сложной формы могут потребовать точность установки до 20 мкм. Особенно сильное влияние на брак сборки может оказать угловое смещение компонента относительно посадочного места, в результате которого крайние выводы ИМС смещаются на величину соизмеримую с расстоянием между соседними контактными площадками. Например, поворот на один градус корпуса PLCC с 84 выводами приводит к смещению крайнего вывода на величину 0,254 мм [51].

Очевидно, что стремление разработчиков к применению новейшей элементной базы и улучшению схемотехнических и конструктивно-технологических характеристик приводит к ужесточению требований к производству узлов РЭА. Особенно сильно повышение требований сказывается на сборочно-монтажных операциях, которые в значительной мере определяют лицо и эффективность радиотехнического предприятия. Вопросы повышения точности сборочно-монтажных операций становятся в ряд с проблемами повышения производительности и стоимости, а развитие сборочно-монтажных производств [59] является одним из ключевых факторов увеличения плотности компоновки.

Технологическая подготовка производства (ТПП) сборочно-монтажных производств базируется на двух принципах: техническом и экономическом [7]. Технический принцип - разрабатываемый ТП должен обеспечивать необходимое качество и надежность сборочно-монтажных производств получаемой электронной аппаратуры. Экономический принцип - разрабатываемый ТП должен обеспечить выпуск изделий с минимальными затратами и с высокой производительностью труда [41]. Под качеством при этом понимается совокупность свойств аппаратуры, удовлетворяющих требованиям заказчика, государственным или мировым стандартам [7].

Являясь одним из основополагающих технологических процессов создания современной РЭА, монтаж компонентов на ПП определяет важнейшие параметры эффективности производства узлов аппаратуры: производительность, стоимость и надежность изделий. Вместе с тем сборочно-монтажное производство оказывает значительное влияние на конструктивные характеристики аппаратуры и, в первую очередь, на ее надежность.

Процесс монтажа состоит из следующих основных операций: нанесение припойной пасты на контактные площадки платы через трафарет, установка элементов на плату, пайка расплавлением дозированного количества пасты и контроль качества монтажа. При организации технологических линий сборочно-монтажного производства основными критериями являются: максимальная производительность при заданных объемах производства, минимальные капитальные вложения, быстрая перенастройка при смене типов модулей, *обеспечение качества сборки и надежности изделий* [61].

С точки зрения обеспечения *качества сборки и надежности изделий* важнейшую роль при поверхностном монтаже играет точность позиционирования компонентов. Применение многовыводных ИМС требует проектирования печатных плат с узкими коммутационными дорожками и с минимальными размерами контактных площадок. При этом могут возникнуть проблемы, связанные с обеспечением необходимого диэлектрического зазора и образованием перемычек припоя между соседними контактными площадками и выводами [51], т.е. к общей потере *надежности устройства*.

Переход предприятий на передовую «бессвинцовую» технологию усиливает влияние погрешностей установки компонентов на качество и надежность монтажа [53]. В отличие от паяльных паст, содержащих свинец, бессвинцовые пасты в большинстве случаев характеризуются практически отсутствующим эффектом самоцентрирования компонентов при пайке. Эти факторы оказывают существенное влияние на сборочно-монтажные процессы, так как для получения

качественной продукции необходимо обеспечить новый уровень точности нанесения паяльных паст и установки компонентов [39] [67].

Технические требования к монтажу компонентов на ПП определены в национальных стандартах РФ [21] [22] [23] [24]. Основные требования к качеству определены в национальных стандартах [26] [27] [28]. Стандарты дают четкую классификацию и устанавливают требования к материалам, компонентам, оборудованию, подготовке технологических операций (ТО), режимам ТО. Перечисленные выше ГОСТы регламентируют требования:

- 1) к подготовке ТП, компонентов, монтажных поверхностей;
- 2) к нанесению паяльной пасты и непроводящего клея;
- 3) к установке компонентов для поверхностного монтажа и монтажа в сквозные отверстия;
- 4) к пайке выводов компонентов;
- 5) к очистке, электрическим испытаниям, ремонту и нанесению защитных покрытий.

Основываясь на приведенных стандартах и тенденциях создания сборочно-монтажных производств можно определить пути повышения их эффективности с позиций заказчика РЭА, разработчика, технолога и организатора производства.

В ГОСТах и в многочисленных работах по повышению качества ТП сборки и монтажа компонентов на ПП [54] [60] [65] [66] [67] определены основные факторы, влияющие на показатели качества узлов и эффективность ТП. Параметры, влияющие на точность автоматов сборки: вибрации станины, вибрации манипуляторов, тип привода (одно и двухприводные), видеосистема для центрирования и ориентации.

При применении бессвинцовой технологии понижается клейкость пасты, поэтому, например, любые вибрации могут быть критичными для смещения компонентов в процессе монтажа. Разработчики современных автоматов установки компонентов уделяют большое внимание снижению вибраций и

ускорений платы с компонентами при транспортировке по конвейерной системе и сборочному столу.

Системам с большим количеством установочных головок традиционно присущи большие вибрации. Рабочий ход одной из головок может вызывать незначительные перемещения остальных. В то же время, вся система должна сохранять устойчивость в течение выполнения всего процесса установки, начиная с распознавания реперных знаков и заканчивая установкой таких компонентов как 0201 или *fine-pitch*. Чтобы предотвратить подобные смещения большинство автоматов имеет повышенную массу основания и подвижных элементов системы перемещения для исключения случайных смещений. В настоящее время разработаны облегченные конструкции автоматов портального типа, работающих на больших скоростях захвата и установки компонентов. Конструкция машин такова, что уменьшается инерционность подвижных элементов, регулируется скорость перемещения в зависимости от положения на траектории движения головки, а соответственно и исключаются вибрационные удары, влияющие на точность установочных головок.

При повышении точности ПП одним из наиболее «проблемных» видов деформации становится температурное расширение конструкции автомата установки компонентов. Изменение температуры в рабочем помещении, нагревание узлов автомата в процессе работы, выделение тепла разными узлами автомата и системой их вентиляции, различия в степени расширения узлов станка при нагревании становятся причинами погрешность установки компонента. При колебании температуры в помещении $\pm 5^{\circ}\text{C}$ суммарная погрешность установки компонента может составить ± 100 мкм [53]. К этому добавляется погрешность установки, которая указана в спецификации (как правило, она составляет ± 30 мкм). Получим погрешность установки ± 130 мкм. В стандарте IPC-6012B [101] рекомендуется не превышать смещение более чем на 25% от линейных размеров компонента. Для малогабаритных компонентов, например меньше 0402 (размеры 1,0x0,5 мм), при длине станины в два метра монтаж компонентов будет

под вопросом в помещении с переменной температурой. Разумеется, можно обеспечить высокую точность станков и машин, но это требует наличия специальных средств компенсации погрешностей и калибровки или использования стабилизации температуры в помещениях. Такие решения, как правило, дорогостоящие, и не все производители оснащают станки данными средствами, использование которых окупается только при крупносерийном и массовом производстве. Менее крупные фирмы ограничены в выборе современных средств, поэтому при размещении заказа на сборочно-монтажном производстве следует учитывать достижимый уровень качества монтажа.

Вопросы гарантированной точности и надежности узлов аппаратуры возникают и при необходимости организации собственных сборочно-монтажных производств. При большом разнообразии на рынке предложений оборудования для сборочно-монтажных производств [50] [87] возникают потребности оптимального выбора технологических решений в процессе технологической подготовки производства (ТПП). Поставив перед собой вопрос об оснащении собственного участка сборки и монтажа, при всем многообразии предложений на рынке предприятие выбирает оборудование по параметрам цене и по техническим характеристикам для вариантов оснащения производственного участка. При выборе необходимо учесть большое количество влияющих факторов: особенности производства и требования к конструкции и схеме создаваемых радиоустройств, экономические возможности и т.д. учесть и увязать все критерии очень непросто, а цена ошибки может быть непредсказуемо высока.

Требования к сборочно-монтажным технологиям варьируются в зависимости от конкретных условий производства, требований к конструкции создаваемых узлов на прецизионных ПП. Их учет и перед разработчиками математического обеспечения стоит задача создания методов и алгоритмов, хорошо адаптируемых под многообразные условия задачи.

Проведенный анализ вопросов сборки и монтажа радиотехнических устройств на прецизионных ПП показывает:

1. Существующая современная элементная база предъявляет повышенные требования к точности технологических процессов сборки и монтажа.

2. Точность установки компонентов на плату является важнейшим параметром, влияющим на надежность радиотехнических устройств на прецизионных ПП при поверхностном монтаже.

3. Проектирование узлов РЭА на печатных платах с максимальной плотностью установки многовыводных ИМС, узкими коммутационными дорожками и с минимальными размерами контактных площадок повышает требования к точности сборочно-монтажных операций.

4. При проектировании технологических линий сборочно-монтажного производства основными критериями являются: максимальная производительность при заданных объемах производства, минимальные капитальные вложения, быстрая перенастройка при смене типов модулей, обеспечение качества сборки.

Достижение высоких показателей по точности монтажа компонентов на прецизионных ПП, позволяющее применять в радиоустройствах современные микроминиатюрные компоненты, ИМС с минимальным шагом размещения выводов требуют значительных затрат на внедрение передовых технологий, что ограничивает возможности создания собственных сборочно-монтажных производств и приводит к удорожанию производства узлов на заказ малыми партиями. Поэтому для создания радиотехнического устройства с оптимальными показателями по надежности и стоимости проектировщик должен иметь четкое представление о достижимости технических характеристик с учетом возможностей сборочно-монтажного производства. Для достижения этих оптимальных показателей необходимо выполнить многовариантный анализ и выбор значений большого количества разнообразных факторов, относящихся к конструкции устройств и к технологии изготовления. Эффективный поиск

оптимальных решений возможен только с применением программно-алгоритмических методов.

1.4. Постановка задач диссертации

Проведенный в разделах 1.1-1.3 анализ разработок и исследований в области технологий производства устройств на ПП позволяет сделать выводы об общих тенденциях непрерывного и ускоренного развития технологий производства устройств на ПП, характеризующихся: повышением уровня интеграции аппаратуры, возрастающей ролью быстродействующих цифровых устройств, прогрессом элементной базы, совершенствованием технологического оборудования, появлением новых материалов.

Практика показывает, что в современной радиоаппаратуре при возрастающей роли быстродействующих цифровых устройств становится особенно *актуальной* задача проектирования ПП с контролируемым волновым сопротивлением, в ходе решения которой на этапе конструирования осуществляется наряду с синтезом конструкции ПП и моделирование работы устройства с учетом параметров межсоединений. Не менее остро проблемы обеспечения параметров сигнальных проводников быстродействующих устройств проявляются на стадии производства ПП. В условиях ужесточения проектных норм при увеличении плотности трасс на ПП возрастает влияние погрешностей на волновые свойства линий прохождения сигнала. Можно сделать вывод, что работоспособность устройств в значительной мере определяется технологическим процессом изготовления ПП.

Возникают задачи прогнозирования на этапе проектирования и контроля на этапе производства погрешностей конструктивных параметров печатных проводников.

В настоящее время влияние погрешностей при проектировании быстродействующих цифровых устройств на ПП определяется эмпирическими методами путем тестирования образцов на производстве. Такой подход приводит к значительному растягиванию времени и удорожанию создания изделий.

В связи с этим становится *актуальной задачей* расчета и прогнозирования влияния погрешностей технологий ПП на уход параметров быстродействующих цифровых схем за пределы допуска с целью обеспечения надежности изделий. Необходима простая и эффективная методика расчета, которая позволила бы на этапе разработки конструкции ПП учитывать возможности применяемой технологии. Это поможет конструктору адекватно представлять результаты реализации разработки в производственном процессе.

Контроль качества является одной из наиболее сложных и дорогостоящих операций в технологиях производства ПП. Установки технологического контроля известных производителей стоят миллионы рублей и занимают значительные площади производственных помещений. Такие установки не всегда доступны небольшим предприятиям и предприятиям, не специализующимся на крупносерийном производстве ПП. Кроме ресурсных затрат существующие установки контроля требуют очень сложной подготовки специалистов, налаживания ТП контроля. Становится *актуальной задачей* разработки методов контроля ПП, которые, обеспечивая достаточную точность и производительность измерений, не потребуют крупных инвестиций в операции контроля.

Значительное влияние на качество узлов оказывают операции сборки и монтажа. В условиях уменьшения размеров компонентов и проектных норм ПП резко возрастает вероятность брака. Поэтому при проектировании узлов РЭА на ПП весьма *актуальна задача* прогнозирования влияния точности сборочно-монтажных операций на показатели надежности радиотехнических устройств.

Необходимо найти компромиссный вариант между затратами на производственное оборудование, применяемой элементной базой, требуемой точностью изготовления ПП и надежностью монтажа компонентов.

Вопросам повышения надежности ПП посвящено множество работ. Вместе с тем данная тема требует дальнейшего развития, т.к. увеличение сложности современной аппаратуры ставит все новые проблемы перед разработчиками прецизионных ПП. В диссертации рассмотрены вопросы исследования влияния

погрешностей производства прецизионных ПП на показатели надежности радиотехнических устройств и методы улучшения этих показателей с применением прогнозирования, контроля и оптимизации конструктивно-технологических параметров ПП.

Опираясь на приведенные в главе 1 анализа состояния вопроса совершенствования ТП создания узлов на ПП, были выделены следующие направления исследований:

1. Исследование и разработка методов повышения надежности прецизионных ПП для цифровых устройств высокого быстродействия включением в цикл проектирования процедур расчета погрешностей ПП, которые позволят прогнозировать отклонение волнового сопротивления печатных проводников узлов РЭА от заданных допусков с учетом погрешностей, вносимых технологическими операциями изготовления ПП.

2. Создание новых технологических методов контроля погрешностей производства ПП, которые позволят значительно упростить и удешевить проверку ПП на соответствие требованиям допусков. Целью создания новых методов является предоставление изготовителям ПП простых и экономичных методов контроля партий изделий при сохранении производительности ТП в условиях мелкосерийного и опытного производства.

3. Разработка программно-алгоритмических методов прогнозирования вероятности нарушения допусков на автоматизированную установку компонентов в посадочные места ПП. Целью разработки новых методов является обеспечение надежности монтажа компонентов на поверхности ПП при конструировании и при выборе сборочно-монтажного производства узлов РЭА на ПП.

4. На основе предложенных методов прогнозирования разработка алгоритмов оптимизации конструктивных параметров прецизионных ПП по критерию максимальной плотности межсоединений с учетом обеспечения надежного монтажа компонентов на поверхности ПП.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ДОПУСКОВЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПП ДЛЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

2.1. Конструктивно-технологические погрешности прецизионных ПП быстродействующих цифровых устройств

Современный этап создания узлов для цифровой обработки сигналов характеризуется значительным повышением быстродействия устройств, переходом к работе на высоких тактовых частотах, повышением плотности проводников и компонентов на ПП. Межсоединения в ПП оказывают значительное воздействие на форму и параметры задержки быстродействующих цифровых сигналов, являясь одной из причин нарушения их целостности (п. 1.1). Любые изменения поперечного сечения или геометрической формы проводников на пути прохождения токов изменяют волновое сопротивление линии и соответственно влияют на форму сигнала [40] [47] [93] [94].

В разработке конструкций узлов на ПП проектировщики используют методики, основанные на последовательном, циклическом подходе, в котором инженер схемотехник и конструктор совместно решают задачу проектирования [47]. Как показано в приложении В, переход на более высокочастотные диапазоны при возрастании плотности монтажа приводит к возрастанию влияния производственных погрешностей ПП на работоспособность устройств. Для обеспечения необходимого уровня надежности появляется необходимость включения в процесс проектирования специалистов по технологиям производства ПП, задачей которых является прогнозирование влияния производственно-технологических погрешностей на электрические параметры узлов после изготовления.

При изготовлении ПП, а также при их эксплуатации проявляются факторы, оказывающие дестабилизирующее воздействие на электрофизические параметры межсоединений. Причиной появления дестабилизирующих факторов чаще всего

может явиться отклонения размеров и расположения элементов конструкции ПП в результате нестабильности воспроизводимых технологическим процессом параметров изделия. В итоге параметры узла отличаются от расчетных значений, что сказывается на увеличении брака и снижении надежности ПП.

Факторы, определяющие конструктивно-технологические погрешности линий передачи высокочастотных сигналов можно разделить на 4 группы [8]: погрешности геометрии сечений межсоединений, погрешности микрогеометрии, разброс электрических и магнитных параметров конструкционных материалов, погрешности формы печатных проводников.

Погрешности геометрии включают: разброс по ширине и толщине проводника, разброс по толщине диэлектрика. Погрешности микрогеометрии вызваны: шероховатостью и дефекты токонесущей поверхности. Разброс электрических и магнитных параметров конструкционных материалов включает: неравномерность свойств проводников и диэлектриков платы. Погрешности формы включают: нарушения параллельности проводников и отклонение расположения проводников относительно выбранной расчетной модели.

Все перечисленные погрешности являются погрешностям конструкции и зависят от технологического процесса производства. Появление конструктивно-технологических погрешностей ведет к изменению электрических параметров печатных проводников. Поскольку эти погрешности по своей природе случайные, то и изменения, вызванные ими, будут случайными, подчиняться некоторому закону распределения случайных величин.

От величины погрешности при выбранном технологическом оборудовании зависит возможность достижения заданного класса точности ПП. Чем выше класс точности ПП, тем сложнее обеспечить минимальные значения допусков, тем более жесткие требования предъявляются к технологическому процессу.

При проектировании ПП современных радиотехнических устройств обработки сигналов контроль за выполнением требований к величине волнового сопротивления межсоединений является обязательным условием успешного

осуществления проекта. Предметом дальнейшего рассмотрения является анализ влияния конструктивно-технологических погрешностей на этот важнейший параметр печатных проводников. К данному направлению исследований последнее время наблюдается повышенный интерес [45] [78].

Допусковый контроль конструктивно-технологических погрешностей межсоединений ПП позволяет при верификации устройства учитывать влияние производства на работоспособность изделия. При этом ПП выступает в роли основного элемента конструкции, вносящего значительный вклад в надежность проектируемого устройства. Поэтому важно не только исследовать степень влияния погрешностей на работоспособность, но и рассчитать параметры надежности ПП, которые можно использовать при оценке надежности устройства.

Параметры многослойных печатных плат (МПП), которые обычно [12] [13] [19] называют основными геометрическими параметрами, приведены в таблице 2.1 [45].

Таблица 2.1 – Основные геометрические параметры и допуски МПП [45]

№	Параметр		Погрешность	Допуск
	Наименование	Обозначение		
1	Ширина печатного проводника	t	Δt	Δt
2	Диаметр монтажного отверстия	d	Δd	Δd
3	Диаметр контактной площадки	D	δD	ΔD
	Смещение относительно номинального положения:			
4	а) печатного элемента;	$\Delta_{ПЭ}$	δP	ΔP
5	б) монтажного отверстия	$\Delta_{МО}$	Δr	Δr
6	Ширина гарантийного пояса контактной площадки	b	Δb	Δb

Технологические факторы, влияющие на погрешности ПП

Погрешность размеров печатных элементов δt , δD является функцией следующих составляющих: погрешности размеров печатных элементов на

фотошаблоне $\delta t^{\Phi\Pi}$, $\delta D^{\Phi\Pi}$, изменения этих размеров на операциях получения защитного рельефа $\delta t^{\Phi X}$, $\delta D^{\Phi X}$, травления меди δt^{TM} , δD^{TM} , гальванического осаждения меди и покрытий δt^{Γ} , δD^{Γ} , а также оплавления покрытия δt^{OP} , δD^{OP} , [45].

Теоретические и экспериментальные исследования показывают [45]:

– что каждая из перечисленных погрешностей зависит от значительного числа факторов систематического и случайного характера, это дает основание рассматривать эти погрешности как случайные величины;

– погрешности отдельных операций практически независимы между собой;

– между толщиной гальванически осаждаемых металлов (меди и покрытий)

h_{Γ} и погрешностью δt^{Γ} , δD^{Γ} существует корреляционная зависимость.

Проведенные в работе [45] исследования показывают, что наилучшую аппроксимацию распределения погрешности ширины проводников дает нормальный закон распределения, параметры которого (математическое ожидание и дисперсия) могут быть рассчитаны по следующим формулам:

1. Математическое ожидание погрешности ширины проводника на внутренних слоях определяется, как сумма математических ожиданий погрешностей

$$M(\delta t^{\Sigma}) = M(\delta t^{\Phi\Pi}) + M(\delta t^{\Phi X}) + M(\delta t^{\text{TP}}),$$

2. Математическое ожидание погрешности ширины проводника на внешних слоях определяется, как сумма математических ожиданий погрешностей

$$M(\delta t^{\Sigma}) = M(\delta t^{\Phi\Pi}) + M(\delta t^{\Phi X}) + M(\delta t^{\text{TP}}) + M(\delta t^{\text{OP}}) + M(\delta t^{\Gamma}),$$

3. Дисперсия отклонения ширины проводника от номинального значения на внутренних слоях определяется, как сумма дисперсий погрешностей

$$\sigma^2(\delta t^{\Sigma}) = \sigma^2(\delta t^{\Phi\Pi}) + \sigma^2(\delta t^{\Phi X}) + \sigma^2(\delta t^{\text{TP}}),$$

4. Дисперсия отклонения ширины проводника от номинального значения на внешних слоях определяется, как сумма дисперсий погрешностей

$$\sigma^2(\delta t^{\Sigma}) = \sigma^2(\delta t^{\Phi\Pi}) + \sigma^2(\delta t^{\Phi X}) + \sigma^2(\delta t^{\text{TP}}) + \sigma^2(\delta t^{\text{OP}}) + \sigma^2(\delta t^{\Gamma}), \quad (2.4)$$

Допустимые предельные отклонения размеров проводящего рисунка в зависимости от класса точности ПП приведены в таблице 2.2 [14].

Таблица 2.2 - Предельные отклонения размеров печатных проводников [14]

Предельное отклонение размеров проводящего рисунка для класса точности (мм)						
1	2	3	4	5	6	7
+0,25/-0,15	+0,15/-0,10	±0,10	±0,05	±0,03	±0,02	±0,015

Предположим, что технологическое оборудование позволяет изготавливать печатные проводники с предельными допуском на ширину $\pm\Delta = 0,03; 0,02; 0,015$ мм. В таблице 2.3 показаны значения относительных погрешностей ширины печатных проводников, изготовленных при значениях этого допуска для всех классов точности.

Таблица 2.3 -Относительные погрешности ширины печатных проводников

	Δ , мм	Класс точности						
		1	2	3	4	5	6	7
Ширина проводника, мм		0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,050
Относительная погрешность, %	0,03	4	6,7	12	20	30	-	-
	0,02	2,7	4,4	8	13,3	20	26,7	-
	0,015	2	3,3	6	10	15	20	30

Переход к более высоким классам точности приводит к уменьшению длины проводников. А это в свою очередь дает возможность уменьшить задержки в сигнальных проводниках, снизив искажения сигналов и обеспечить их целостность в проектируемой схеме [40] [47]. С другой стороны, как следует из таблицы 2.3 при выборе высоких классов точности увеличиваются относительные погрешности геометрии ширины печатных проводников. Отклонение ширины проводников оказывает значительное влияние на волновое сопротивление (см. п. 2.3). В приложении Б произведены расчеты и анализ воздействия погрешностей волнового сопротивления на параметры сигнала, которые показывают, что погрешность волнового сопротивления сильно сказывается на рассогласовании сигналов в логических схемах. При погрешности волнового сопротивления 10-

20% в высокоскоростных цифровых схемах может наблюдаться нарушение синхронизации подачи цифровых сигналов на входы микросхем.

Таким образом переход к высоким классам точности ПП диктуется логикой развития новейших образцов цифровых устройств. В тоже время повышение уровня плотности монтажа приводит к возрастанию роли технологических факторов в нестабильности конструктивных параметров ПП. *Поэтому требуется более тщательный анализ влияния и возможностей применяемых технологий для создания работоспособных изделий.*

Существующие методы расчета параметрической надежности радиоэлектронной аппаратуры используют статистические и аналитические подходы. При прогнозировании надежности наиболее точные результаты дает вероятностный метод расчета, который основан на законах распределения погрешностей параметров изделия и их влияния на выходной параметр [85]. Для применения данного метода необходимо получить аналитическое выражение выходного параметра, определяющее его связь с параметрами компонентов или с конструктивно-технологическими параметрами изделия. Выбрав в качестве выходного параметра волновое сопротивление, необходимо провести исследования для установления наиболее предпочтительных (точных) аналитических зависимостей, которые позволят в процессе проектирования ПП прогнозировать реальные отклонения значения волнового сопротивления и вероятности нарушения допусков по данному параметру в производственном процессе с учетом законов распределения погрешностей технологических операций.

2.2. Исследование аналитических зависимостей волнового сопротивления от конструктивных параметров межсоединений печатных плат быстродействующих узлов цифровой обработки информации

Как отмечается в работах специалистов по проектированию ПП для цифровых устройств [8] [40] [47] [93] [94], волновое сопротивление линии

передачи - это тот параметр, который требует совместного обсуждения разработчика принципиальной схемы и конструктора печатной платы. Межсоединения ПП на высоких частотах представляют для сигналов длинные линии передачи, которые должны быть согласованы. Если при конструировании печатной платы линия передачи не будет иметь требуемого волнового сопротивления, то проведенное при разработке принципиальной схемы согласование драйверов и приемников сигналов окажется бесполезным.

При конструировании печатных плат с контролируемым волновым сопротивлением используется информация о параметрах сечения сигнальных проводников, толщинах и параметрах изоляционных материалов и в целом о геометрии печатного монтажа и конструкции платы. Зависимости волнового сопротивления печатного монтажа от конструктивно-технологических параметров описываются дифференциальными уравнениями и точно могут быть рассчитаны только с помощью методов конформных преобразований или численными методами [47]. Все известные промышленные системы синтеза и анализа межсоединений ПП для высокочастотных схем базируются на точных методах. Однако аппроксимация в виде приближенных аналитических соотношений может заменить при определенных допущениях применение программных средств моделирования.

При необходимости непосредственного вычисления волнового сопротивления можно воспользоваться сводкой расчетных формул для линий передач в печатных платах, которая представлена стандартах по печатным платам и в ряде научных работ по данной тематике [15] [93] [94] [100] [103] [105].

В литературе по проектированию межсоединений ПП для быстродействующих цифровых устройств приводятся различные варианты аналитических выражений для расчета волнового сопротивления. Остановимся на двух комплектах формул.

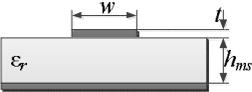
Группа формул Ф1, взятых из [100], приведены во второй колонке таблицы 2.4. Формулы группы Ф1 позволяют выполнять вычисления для 4 типов

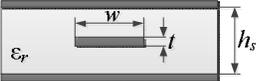
полосковых линий с достаточно высокой точностью. Ограничения их применения связаны с выполнением условий на соотношение размеров в сечении проводников.

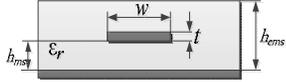
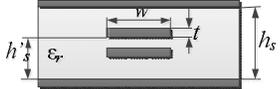
Формулы группы Ф2 [40] [94], приведены в третьей колонке таблицы 2.4. Особенностью этой группы, является более детальная привязка к различным вариантам отношения ширины проводника и толщины диэлектрика.

В записанных формулах ϵ_r – диэлектрическая проницаемость основания ПП; ϵ_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость основания ПП; h_{ms} – толщина диэлектрика между проводником и заземленным слоем в микрополосковой линии; h_s – толщина диэлектрика между заземленными слоями в полосковой линии; h_{ems} – толщина диэлектрика в заглубленной линии; h'_s – максимальное расстояние от проводника до заземленного слоя, t – толщина слоя металлизации; w – ширина проводника.

Таблица 2.4 - Формулы для расчета волнового сопротивления линий передачи на печатных платах

Сечение линии	Φ1	Φ2
<p>Микрополосковая линия</p> 	$Z = \frac{60}{\sqrt{0,47\varepsilon_r + 0,67}} \ln \left[\frac{4h_{ms}}{0,67(0,8w + t)} \right]$ <p>, (2.5)</p>	$Z = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \ln \left[\frac{8h_{ms}}{w + 1,25t/\pi \cdot \left[1 + \ln \left(4\pi w/t \right) \right]} + \frac{w + 1,25t/\pi \cdot \left[1 + \ln \left(4\pi w/t \right) \right]}{4h_{ms}} \right]$ <p>если $\frac{w}{h_{ms}} < \frac{1}{2\pi}$, (2.9)</p> <p>где $\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12h_{ms}/w}} + 0,04 \left(1 - \frac{w}{h_{ms}} \right)^2 \right] - \frac{(\varepsilon_r - 1) \cdot t/h_{ms}}{4,6\sqrt{w/h_{ms}}}$</p> $Z = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \ln \left[\frac{8h_{ms}}{w + 1,25t/\pi \cdot \left[1 + \ln \left(2h_{ms}/t \right) \right]} + \frac{w + 1,25t/\pi \cdot \left[1 + \ln \left(2h_{ms}/t \right) \right]}{4h_{ms}} \right]$ <p>если $\frac{1}{2\pi} < \frac{w}{h_{ms}} < 1$, (2.10)</p> <p>где $\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12h_{ms}/w}} + 0,04 \left(1 - \frac{w}{h_{ms}} \right)^2 \right] - \frac{(\varepsilon_r - 1) \cdot t/h_{ms}}{4,6\sqrt{w/h_{ms}}}$</p>

Сечение линии	Φ1	Φ2
		$Z = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \left[\frac{w + 1,25t/\pi \cdot \left[1 + \ln\left(\frac{2h_{ms}}{t}\right) \right]}{h_{ms}} + 1,393 + 0,677 \cdot \ln\left(\frac{w + 1,25t/\pi \cdot \left[1 + \ln\left(\frac{2h_{ms}}{t}\right) \right]}{h_{ms}} + 1,444 \right) \right]^{-1}$ <p>если $\frac{w}{h_{ms}} > 1$, (2.11)</p> <p>где $\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12h_{ms}/w}} \right] - \frac{(\varepsilon_r - 1) \cdot t/h_{ms}}{4,6\sqrt{w/h_{ms}}}$</p>
<p>Полосковая линия</p> 	$Z = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \left[\frac{4h_s}{0,67\pi(0,8w+t)} \right], \quad (2.6)$ <p>при $h_s - t > 2w$, $h_s > 4t$</p>	$Z = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \left[\frac{4h_s}{\pi \frac{w}{2} \left[1 + \frac{t}{\pi w} \left[1 + \ln\left(\frac{4\pi w}{t}\right) \right] + 0,255\left(\frac{t}{w}\right)^2 \right]} \right], \quad \text{если } \frac{w}{h_s} < 0,35$ <p>(2.12)</p> $Z = \frac{94,15}{\sqrt{\varepsilon_r}} \left\{ \frac{w/h_s}{1 - t/h_s} + \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{2}{1 - t/h_s} \ln\left(\frac{1}{1 - t/h_s} + 1\right) - \left(\frac{1}{1 - t/h_s} - 1\right) \ln\left(\frac{1}{\left(1 - t/h_s\right)^2} - 1\right) \right] \right\}^{-1},$ <p>если $\frac{w}{h_s} > 0,35$ (2.13)</p>

Сечение линии	Φ1	Φ2
<p data-bbox="184 347 384 375">Заглубленная линия</p> 	$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \frac{5,98 h_{ms}}{0,8w+t}, \quad (2.7)$ <p data-bbox="464 435 884 526">где $\epsilon_{eff} = \epsilon_r \left[1 - \exp\left(\frac{-1,55 h_{ms}}{h_{ms}}\right) \right]$</p>	
<p data-bbox="142 594 411 621">Двойная полосковая линия</p> 	$Z = \frac{80}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left[\frac{1,9(2h_{ms} + t)}{0,8w+t} \right] \left[1 - \frac{h_{ms}}{4h'_s} \right],$ <p data-bbox="464 683 527 711">(2.8)</p> <p data-bbox="464 735 726 773">где $h_{ms} = h_s - h'_s - t$</p>	

Для прикладных вычислений необходимо выполнить анализ точности формул в диапазоне параметров, применяемых при проектировании ПП быстродействующих цифровых устройств. Анализ точности двух вариантов аналитических выражений выполним с помощью САД ADS2008, которая базируется на фундаментальных методах моделирования и используется в проектировании СВЧ схем в радиопромышленности.

Исследования выполнены при типовых значениях параметров ПП $\varepsilon_r = 4,5$, $h_{ms} = 0,105$ мм, $t = 0,035$ мм, $w = 0,05 \div 0,25$ мм. Для анализа были выбраны интервалы изменения ширины проводника в диапазоне значений различных классов точности. Для класса точности 7 диапазон изменения ширины – 0,05-0,07 мм, для класса точности 6 диапазон изменения ширины – 0,075-0,095 мм, для класса точности 5 диапазон изменения ширины – 0,1-0,145 мм, для класса точности 4 диапазон изменения ширины – 0,15-0,25 мм.

Полное описание результатов численных экспериментов приведены в приложении А. Они позволяют дать оценку возможности и точности применяемых аналитических выражений.

График зависимостей волнового сопротивления от параметров межсоединений микрополосковой линии приведен на рисунке 2.1.

Зависимости показывают максимальные ошибки расчета формул по сравнению с результатами моделирования с помощью программы ADS2008:

В диапазоне класса точности 4:

- для формулы (2.5) (Ф1): -13,04%;
- для формулы (2.9-2.11) (Ф2): 0,35%.

В диапазоне класса точности 5:

- для формулы (2.5) (Ф1): -6,1%;
- для формулы (2.9-2.11) (Ф2): 0,32%.

В диапазоне класса точности 6:

- для формулы (2.5) (Ф1): -5,7%;
- для формулы (2.9-2.11) (Ф2): 0,26%.

В диапазоне класса точности 7:

- для формулы (2.5) (Ф1): -7,0%;
- для формулы (2.9-2.11) (Ф2): 0,13%.

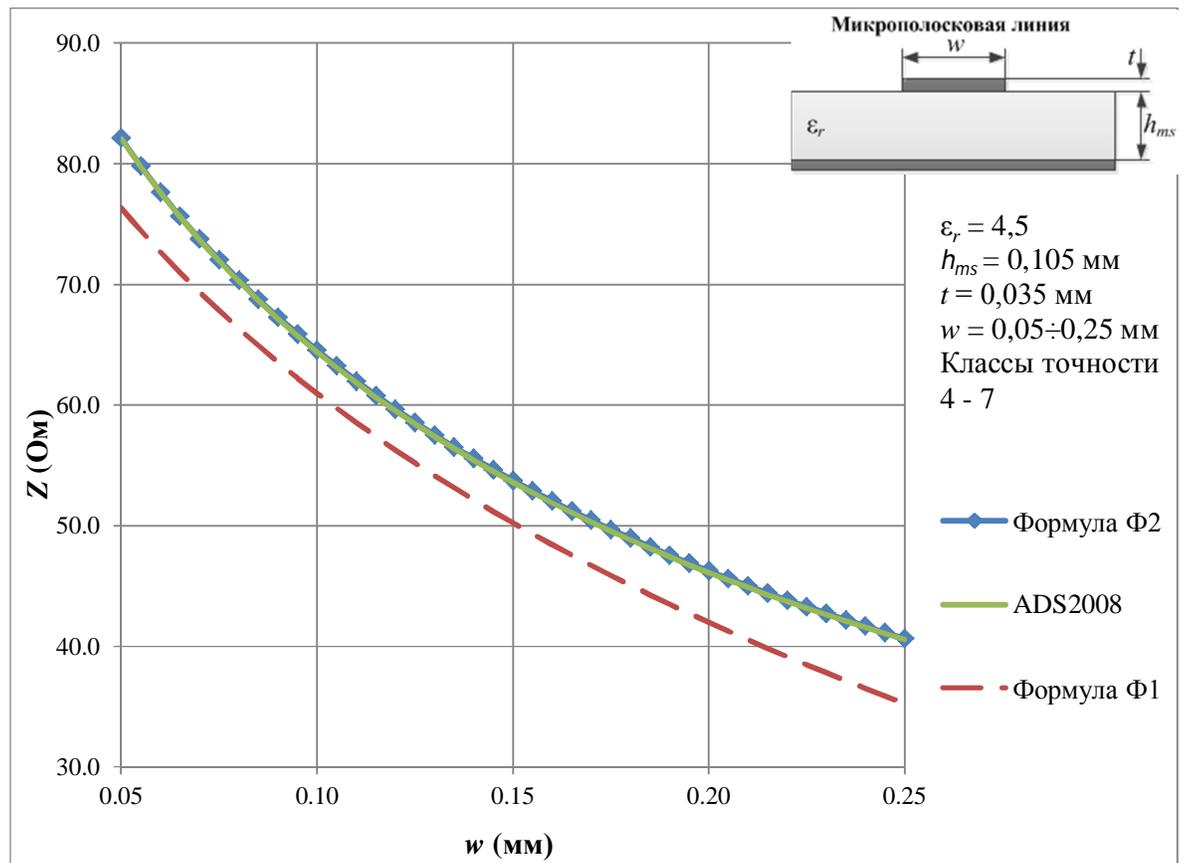


Рисунок 2.1 - Зависимость волнового сопротивления (Z) от ширины проводника (w) для микрополосковой линии

Результат показывает, что группа формул Ф2 дает весьма точные результаты вычисления волнового сопротивления во всем диапазоне изменения значений ширины проводников для всех исследуемых классов точности.

График зависимостей волнового сопротивления от параметров межсоединений полосковой линии приведен на рисунке 2.2.

Максимальная ошибка расчета точной формулы по сравнению с программой ADS2008:

- В диапазоне класса точности 4:
 - для формулы (2.6) (Ф1): -3,71%;
 - для формулы (2.12-2.13) (Ф2): 0,66%.

В диапазоне класса точности 5:

- для формулы (2.6) (Ф1): 2,15%;
- для формулы (2.12-2.13) (Ф2): 2,13%.

В диапазоне класса точности 6:

- для формулы (2.6) (Ф1): 3,5%;
- для формулы (2.12-2.13) (Ф2): 3,61%.

В диапазоне класса точности 7:

- для формулы (2.6) (Ф1): 5,43%;
- для формулы (2.12-2.13) (Ф2): 5,82%.

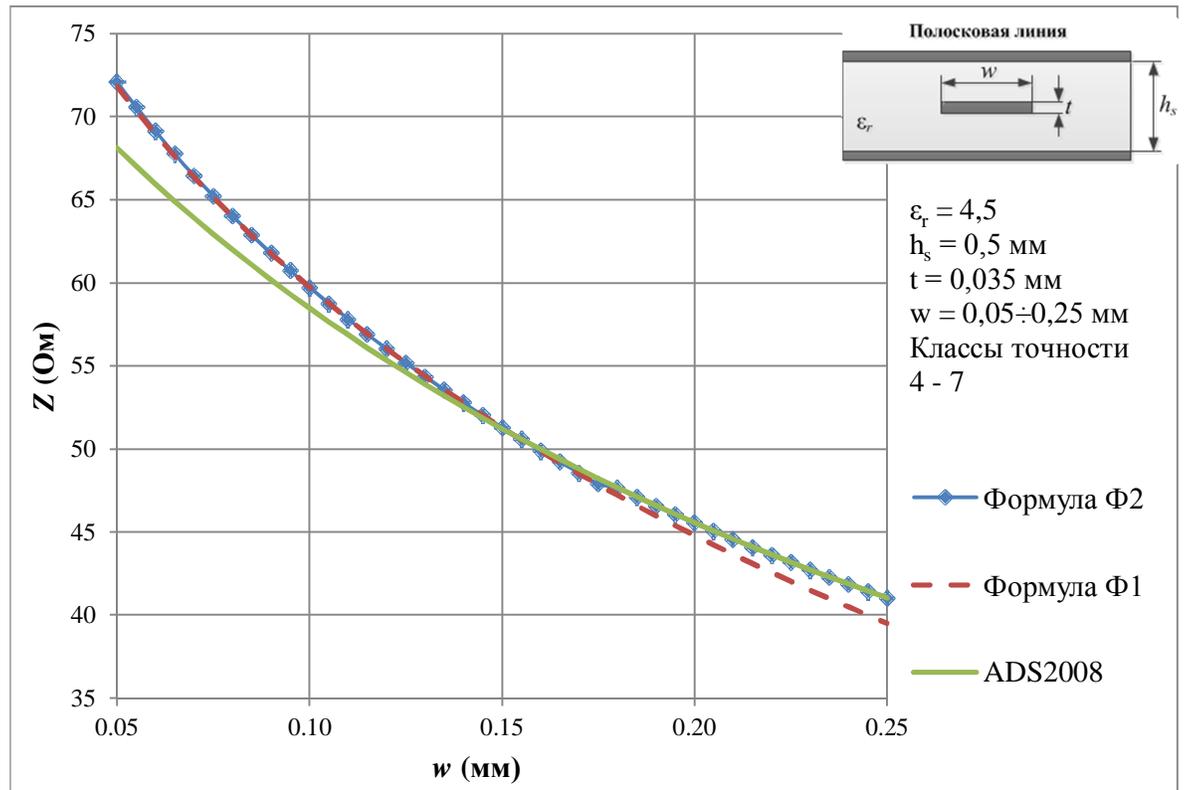


Рисунок 2.2 - Зависимость волнового сопротивления (Z) от ширины проводника (w) для полосковой линии

Исследование показывает, что формулы группы Ф1 дают для полосковой линии несколько более точные результаты. К тому же эти формулы более простые для преобразований при вычислении коэффициентов влияния.

Итоговые результаты анализа точности в диапазоне значений ширины проводников приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Анализ точности формул расчета волнового сопротивления

	Максимальная ошибка расчета							
	Класс точности 4 ($w=0,15 \div 0,25$ мм)		Класс точности 5 ($w=0,1 \div 0,15$ мм)		Класс точности 6 ($w=0,075 \div 0,1$ мм)		Класс точности 7 ($w=0,05 \div 0,075$ мм)	
	Ф1	Ф2	Ф1	Ф2	Ф1	Ф2	Ф1	Ф2
Микрополосковая линия	-13,04%	0,35%	-6,1%	0,32%	-5,7%	0,26%	-7,0%	0,13%
Полосковая линия	-3,71%	0,66%	2,15%	2,13%	3,5%	3,61%	5,43%	5,82%

Как видно из таблицы 2.5, приведенные приближенные соотношения Ф2 позволяют рассчитать волновое сопротивление для микрополосковой линии с погрешностью менее 0,35% во всем диапазоне изменения значений ширины проводника для классов точности от 4-го до 7-го. Поэтому можно рекомендовать использование данной группы формул для анализа печатных проводников в виде микрополосковых линий.

При расчете ВС печатных проводников в виде полосковых линий большую точность в области типовых значений параметров по классам точности 4-7 дают формулы группы Ф1. Выбранные аналитические выражения позволяют в области типовых значений параметров межсоединений ПП получать погрешности вычислений ВС для полосковой линии: 0,66% (4-й класс точности), 2,13% (5-й класс точности), 3,5% (6-й класс точности). Волновое сопротивление полосковых линий может быть рассчитано для 7-го класса точности с погрешностью менее 5,5%.

2.3. Расчет допусков параметров межсоединений печатных плат быстродействующих узлов цифровой обработки информации

Как видно из аналитических выражений, волновое сопротивление Z является функцией геометрических параметров ($w, h_s, h_{ms}, h_{ems}, h_s', t$) и диэлектрической проницаемости платы ϵ_r .

$$Z = f(w, h_s, h_{ms}, h_{ems}, h_s', t, \epsilon_r), \quad (2.14)$$

Каждый из перечисленных параметров подвержен изменениям в результате погрешностей технологических процессов и нестабильности параметров материалов.

Для записи уравнения погрешностей воспользуемся известными соотношениями теории параметрической надежности для расчета допусков *вероятностным методом* [84]. Согласно теории допусков, если известно аналитическое выражение для выходного параметра N через параметры элементов $q_1, q_2, \dots, q_n: N = f(q_1, q_2, \dots, q_n)$, то относительная погрешность выходного параметра может быть рассчитана с помощью выражения:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{f} \right] \cdot \frac{\Delta q_i}{q_i}, \quad (2.15)$$

Это уравнение является исходным для расчета параметров закона распределения погрешности выходного параметра. Левая часть уравнения представляет собой относительную погрешность выходного параметра радио изделия, а правая – относительные погрешности параметров элементов радио изделия. Член уравнения в квадратных скобках называется *коэффициентом влияния* параметра q_i , который будем обозначать в дальнейшем $A_i = \left[\frac{\partial f}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{f} \right]$.

Ниже буду рассчитываться *производственные* погрешности выходного параметра в зависимости от допусков на параметры элементов конструкции ПП. В п.2.1 было отмечено, что в качестве важнейшего параметра в расчетах длинных линий чаще всего фигурирует волновое сопротивление Z .

Погрешность волнового сопротивления, как случайная величина, характеризуется математическим ожиданием:

$$M \left(\frac{\Delta Z}{Z} \right) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot M \left(\frac{\Delta q_i}{q_i} \right), \quad (2.16)$$

и шириной поля рассеивания относительной погрешности выходного параметра (волнового сопротивления):

$$\delta\left(\frac{\Delta Z}{Z}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \cdot \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}, \quad (2.17)$$

где $M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)$ – математическое ожидание, а $\delta\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)$ – половина поля допуска относительной погрешности $\frac{\Delta q_i}{q_i}$ параметра q_i .

В технической литературе и справочниках, как правило, погрешность параметров материалов и геометрических размеров приводится в виде несмещенной оценки. Поэтому можно предположить, что математическое ожидание погрешностей всех параметров равно $M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) = 0$.

Вторым предположением является допущение, что погрешности распределены по нормальному закону. Последнее предположение следует из факта воздействия на каждый технологический параметр множества дестабилизирующих факторов, которые не зависят друг от друга, т.к. относятся к различным технологическим операциям. Согласно центральной предельной теореме, результирующее распределение в таком случае стремится к нормальному независимо от того, какие распределения у отдельных слагаемых.

Третье допущение связано с тем, что допуски на погрешности параметров $\frac{\Delta q_i}{q_i}$ в технической литературе и справочниках обычно задаются на уровне $\pm 3\sigma$, где σ – среднеквадратичное отклонение погрешности от центра группирования.

И наконец четвертое допущение: приведенные в формуле 2.14 конструктивно-технологические параметры формируются в различных технологических процессах или в различных технологических операциях, корреляция между их значениями равна нулю. Поэтому в формуле 2.17 отсутствуют слагаемые, определяющие корреляционные зависимости.

Рассмотрим расчетные формулы волнового сопротивления для различных вариантов сечения линии (таблица 2.4) и запишем для них уравнения погрешности.

Уравнение относительной погрешности для волнового сопротивления микрополосковой линии будет [35]:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = A_w \frac{\Delta w}{w} + A_h \frac{\Delta h_{ms}}{h_{ms}} + A_t \frac{\Delta t}{t} + A_\epsilon \frac{\Delta \epsilon_r}{\epsilon_r}, \quad (2.18)$$

Аналитические выражения для расчета коэффициентов влияния параметров микрополосковой линии при $w/h_{ms} < 1/2\pi$ выводятся из формулы 2.9 (в формулах 2.19 - 2.30 $h = h_{ms}$):

$$A_w = \frac{\partial Z}{\partial w} \cdot \frac{w}{Z} = \frac{w \cdot \left[\frac{A_{w11}^{(1)}}{A_{w12}^{(1)}} - \frac{\ln(A_{w12}^{(1)}) \cdot A_{w14}^{(1)}}{2 \cdot A_{w13}^{(1)}} \right]}{\ln(A_{w12}^{(1)})}, \quad (2.19)$$

где

$$A_{w11}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot t + 1}{4 \cdot h} - \frac{8 \cdot h \cdot \left(\frac{1,25 \cdot t + 1}{\pi \cdot w} \right)}{\left\{ w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{4\pi \cdot w}{t} \right) + 1 \right] \right\}^2}$$

$$A_{w12}^{(1)} = \frac{8 \cdot h}{w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{4\pi \cdot w}{t} \right) + 1 \right]} + \frac{w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{4\pi \cdot w}{t} \right) + 1 \right]}{4 \cdot h}$$

$$A_{w13}^{(1)} = \frac{\epsilon_r}{2} + \left[\frac{1}{\sqrt{\frac{12 \cdot h}{w} + 1}} + 0,04 \cdot \left(\frac{w}{h} - 1 \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right) - \frac{(\epsilon_r - 1) \cdot t}{4,6 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{w}{h}}} + \frac{1}{2}$$

$$A_{w14}^{(1)} = \left[\frac{0,08 \cdot \left(\frac{w}{h} - 1 \right)}{h} + \frac{6 \cdot h}{w^2 \cdot \left(\frac{12 \cdot h}{w} + 1 \right)^{3/2}} \right] \cdot \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right) + \frac{(\epsilon_r - 1) \cdot t}{2 \cdot 4,6 \cdot h^2 \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^{3/2}}$$

$$A_h = \frac{\partial Z}{\partial h} \cdot \frac{h}{Z} = - \frac{h \cdot \left[\frac{\ln(A_{w12}^{(1)}) \cdot A_{h11}^{(1)}}{2 \cdot A_{w13}^{(1)}} - \frac{A_{h12}^{(1)}}{A_{w12}^{(1)}} \right]}{\ln(A_{w12}^{(1)})}, \quad (2.20)$$

где

$$\begin{aligned}
A_{h11}^{(1)} &= \frac{(\varepsilon_r - 1) \cdot t}{4,6 \cdot h^2 \cdot \sqrt{\frac{w}{h}}} \left[\frac{6}{w \cdot \left(\frac{12 \cdot h}{w} + 1\right)^{3/2}} + \frac{0,08 \cdot w \cdot \left(\frac{w}{h} - 1\right)}{h^2} \right] \cdot \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{2}\right) - \frac{(\varepsilon_r - 1) \cdot t \cdot w}{2 \cdot 4,6 \cdot h^3 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^{3/2}} \\
A_{h12}^{(1)} &= \frac{8}{w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{4\pi \cdot w}{t}\right) + 1 \right]} - \frac{w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{4\pi \cdot w}{t}\right) + 1 \right]}{4 \cdot h^2} \\
A_t &= \frac{\partial Z}{\partial t} \cdot \frac{t}{Z} = \frac{t \cdot \left[\frac{A_{t11}^{(1)}}{A_{w12}^{(1)}} + \frac{\ln(A_{w12}^{(1)}) \cdot (\varepsilon_r - 1)}{2 \cdot 4,6 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{w}{h}} \cdot A_{w13}^{(1)}} \right]}{\ln(A_{w12}^{(1)})}, \tag{2.21}
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
A_{t11}^{(1)} &= \frac{\frac{1,25}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{4\pi \cdot w}{t}\right)}{4h} - \frac{8 \cdot h \cdot \frac{1,25}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{4\pi \cdot w}{t}\right)}{\left\{ w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{4\pi \cdot w}{t}\right) + 1 \right] \right\}^2} \\
A_\varepsilon &= \frac{\partial Z}{\partial \varepsilon_r} \cdot \frac{\varepsilon_r}{Z} = \frac{\varepsilon_r \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot h}{w} + 1}} + 0,02 \cdot \left(\frac{w}{h} - 1\right)^2 - \frac{t}{4,6 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{w}{h}}} + \frac{1}{2} \right]}{2 \cdot A_{w13}^{(1)}}, \tag{2.22}
\end{aligned}$$

Аналитические выражения для расчета коэффициентов влияния параметров микрополосковой линии при $1/2\pi < w/h_{ms} < 1$ выводятся из формулы 2.10:

$$A_w = \frac{\partial Z}{\partial w} \cdot \frac{w}{Z} = \frac{w \cdot \left[\frac{A_{w21}^{(1)}}{A_{w22}^{(1)}} - \frac{\ln(A_{w22}^{(1)}) \cdot A_{w14}^{(1)}}{2 \cdot A_{w13}^{(1)}} \right]}{\ln(A_{w22}^{(1)})}, \tag{2.23}$$

где

$$A_{w21}^{(1)} = \frac{1}{4 \cdot h} - \frac{8 \cdot h}{\left\{ w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot h}{t}\right) + 1 \right] \right\}^2}$$

$$A_{w22}^{(1)} = \frac{8 \cdot h}{w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot h}{t}\right) + 1 \right]} + \frac{w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot h}{t}\right) + 1 \right]}{4 \cdot h}$$

$$A_h = \frac{\partial Z}{\partial h} \cdot \frac{h}{Z} = - \frac{h \cdot \left[\frac{\ln(A_{w22}^{(1)}) \cdot A_{h11}^{(1)} - A_{h21}^{(1)}}{2 \cdot A_{w13}^{(1)} \cdot A_{w22}^{(1)}} \right]}{\ln(A_{w22}^{(1)})}, \quad (2.24)$$

где

$$A_{h21}^{(1)} = \frac{8}{w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot h}{t}\right) + 1 \right]} - \frac{w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot h}{t}\right) + 1 \right]}{4 \cdot h^2} + \frac{1,25 \cdot t}{4 \pi \cdot h^2} - \frac{8 \cdot 1,25 \cdot t}{\pi \cdot \left\{ w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot h}{t}\right) + 1 \right] \right\}^2}$$

$$A_t = \frac{\partial Z}{\partial t} \cdot \frac{t}{Z} = - \frac{t \cdot \left[\frac{A_{t21}^{(1)}}{A_{w22}^{(1)}} + \frac{\ln(A_{w22}^{(1)}) \cdot (\varepsilon_r - 1)}{2 \cdot 4,6 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{w}{h}} \cdot A_{w13}^{(1)}} \right]}{\ln(A_{w22}^{(1)})}, \quad (2.25)$$

где

$$A_{t21}^{(1)} = \frac{\frac{1,25}{4\pi} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{t}\right)}{4h} - \frac{8 \cdot h \cdot \frac{1,25}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{t}\right)}{\left\{ w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot h}{t}\right) + 1 \right] \right\}^2}$$

$$A_\varepsilon = \frac{\partial Z}{\partial \varepsilon_r} \cdot \frac{\varepsilon_r}{Z} = - \frac{\varepsilon_r \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot h}{w}} + 1} + 0,02 \cdot \left(\frac{w}{h} - 1\right)^2 - \frac{t}{4,6 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{w}{h}}} + \frac{1}{2} \right]}{2 \cdot \left\{ \frac{\varepsilon_r}{2} + \left[\frac{1}{\sqrt{\frac{12 \cdot h}{w}} + 1} + 0,04 \cdot \left(\frac{w}{h} - 1\right)^2 \right] \cdot \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{2} - \frac{(\varepsilon_r - 1) \cdot t}{4,6 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{w}{h}}} + \frac{1}{2} \right) \right\}}, \quad (2.26)$$

Аналитические выражения для расчета коэффициентов влияния параметров микрополосковой линии при $w/h_{ms} > 1$ выводятся из формулы 2.11:

$$A_w = \frac{\partial Z}{\partial w} \cdot \frac{w}{Z} = -w \cdot \left[\frac{A_{w31}^{(1)}}{2 \cdot A_{w33}^{(1)}} + \frac{A_{w34}^{(1)}}{A_{w32}^{(1)}} \right], \quad (2.27)$$

где

$$A_{w31}^{(1)} = \frac{6 \cdot h \cdot \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{2} \right)}{w^2 \cdot \left(\frac{12 \cdot h}{w} + 1 \right)^{3/2}} + \frac{(\varepsilon_r - 1) \cdot t}{4,6 \cdot h^2 \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^{3/2}}$$

$$A_{w32}^{(1)} = 0,667 \cdot \ln \left\{ \frac{w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot h}{t} \right) + 1 \right] + 1,444}{h} \right\} + \frac{w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot h}{t} \right) + 1 \right] + 1,393}{h}$$

$$A_{w33}^{(1)} = \frac{\varepsilon_r}{2} + \frac{1}{\sqrt{\frac{12 \cdot h}{w} + 1}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{2} \right) - \frac{(\varepsilon_r - 1) \cdot t}{4,6 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{w}{h}}} + \frac{1}{2}$$

$$A_{w34}^{(1)} = \frac{1}{h} + \frac{0,667}{h \cdot \left\{ \frac{w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot h}{t} \right) + 1 \right] + 1,444}{h} \right\}}$$

$$A_h = \frac{\partial Z}{\partial h} \cdot \frac{h}{Z} = -h \cdot \left[\frac{A_{h31}^{(1)}}{A_{w32}^{(1)}} + \frac{A_{h32}^{(1)}}{2 \cdot A_{w33}^{(1)}} \right], \quad (2.28)$$

где

$$A_{h31}^{(1)} = \frac{1,25}{\pi} \cdot \frac{t}{h^2} - \frac{w + \frac{1,25}{\pi} \cdot t \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot h}{t} \right) + 1 \right]}{h^2} - \frac{0,667 \cdot \left\{ \frac{w + \frac{1,25}{\pi} \cdot t \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot h}{t} \right) + 1 \right]}{h^2} - \frac{1,25}{\pi} \cdot \frac{t}{h^2} \right\}}{\frac{w + \frac{1,25}{\pi} \cdot t \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot h}{t} \right) + 1 \right] + 1,444}{h}}$$

$$A_{h32}^{(1)} = \frac{(\varepsilon_r - 1) \cdot t}{4,6 \cdot h^2 \cdot \sqrt{\frac{w}{h}}} - \frac{6}{w \cdot \left(\frac{12 \cdot h}{w} + 1\right)^{3/2}} \cdot \frac{\varepsilon_r - 1}{2} - \frac{(\varepsilon_r - 1) \cdot t \cdot w}{2 \cdot 4,6 \cdot h^3 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^{3/2}}$$

$$A_t = \frac{\partial Z}{\partial t} \cdot \frac{t}{Z} = -t \cdot \left[\frac{A_{t31}^{(1)}}{A_{w32}^{(1)}} + \frac{(\varepsilon_r - 1)}{2 \cdot 4,6 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{w}{h}} \cdot A_{w33}^{(1)}} \right], \quad (2.29)$$

где

$$A_{t31}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{t}\right)}{h} + \frac{0,667 \cdot \frac{1,25 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{t}\right)}{\pi}}{h \cdot \left\{ \frac{w + \frac{1,25 \cdot t}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot h}{t}\right) + 1 \right]}{h} + 1,444 \right\}}$$

$$A_\varepsilon = \frac{\partial Z}{\partial \varepsilon_r} \cdot \frac{\varepsilon_r}{Z} = - \frac{\varepsilon_r \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot h}{w} + 1}} - \frac{t}{4,6 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{w}{h}}} + \frac{1}{2} \right]}{2 \cdot \left\{ \frac{\varepsilon_r}{2} + \frac{1}{\sqrt{\frac{12 \cdot h}{w} + 1}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{2}\right) - \frac{(\varepsilon_r - 1) \cdot t}{4,6 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{w}{h}}} + \frac{1}{2} \right\}}, \quad (2.30)$$

Уравнение относительной погрешности для волнового сопротивления *полосковой линии* будет:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = A_w \frac{\Delta w}{w} + A_h \frac{\Delta h_s}{h_s} + A_t \frac{\Delta t}{t} + A_\varepsilon \frac{\Delta \varepsilon_r}{\varepsilon_r}, \quad (2.31)$$

По формулам (2.32-2.35) приведены выражения для расчета коэффициентов влияния погрешностей конструктивно-технологических параметров на погрешность волнового сопротивления печатного проводника в виде *полосковой линии*.

$$A_w = \frac{-0,8w}{0,8w + t} \left[\ln\left(\frac{4h_s}{0,67\pi(0,8w + t)}\right) \right]^{-1}, \quad (2.32)$$

$$A_h = \left[\ln \left(\frac{4h_s}{0,67\pi(0,8w+t)} \right) \right]^{-1}, \quad (2.33)$$

$$A_t = \frac{-t}{0,8w+t} \left[\ln \left(\frac{4h_s}{0,67\pi(0,8w+t)} \right) \right]^{-1}, \quad (2.34)$$

$$A_\varepsilon = -\frac{1}{2} \quad (2.35)$$

Для записи уравнения погрешности заглубленной линии воспользуемся формулой (2.7). Аналитические выражения для расчета коэффициентов влияния для заглубленной линии приведены ниже:

$$A_w = \frac{-0,8w}{0,8w+t} \left[\ln \left(\frac{5,98h_{ms}}{0,8w+t} \right) \right]^{-1}, \quad (2.36)$$

$$A_{h_{ms}} = \left[\ln \left(\frac{5,98h_{ms}}{0,8w+t} \right) \right]^{-1} - \frac{0,775h_{ems} \cdot \exp \left(\frac{-1,55h_{ems}}{h_{ms}} \right)}{h_{ms} \left[\exp \left(\frac{-1,55h_{ems}}{h_{ms}} \right) - 1 \right]}, \quad (2.37)$$

$$A_{ems} = \frac{0,775h_{ems} \cdot \exp \left(\frac{-1,55h_{ems}}{h_{ms}} \right)}{h_{ms} \left[\exp \left(\frac{-1,55h_{ems}}{h_{ms}} \right) - 1 \right]}, \quad (2.38)$$

$$A_t = \frac{-t}{0,8w+t} \left[\ln \left(\frac{5,98h_{ms}}{0,8w+t} \right) \right]^{-1}, \quad (2.39)$$

$$A_\varepsilon = -\frac{1}{2} \quad (2.40)$$

Для записи уравнения погрешности двойной полосковой линии воспользуемся формулой (2.8). Аналитические выражения для расчета коэффициентов влияния для заглубленной линии приведены ниже.

$$A_w = \frac{-0,8w}{0,8w+t} \left[\ln \left(\frac{1,9(2h_{ms}+t)}{0,8w+t} \right) \right]^{-1}, \quad (2.41)$$

$$A_{hms} = \frac{h_{ms}}{2h_{ms} + t} \left[\ln \left(\frac{1,9(2h_{ms} + t)}{0,8w + t} \right) \right]^{-1} + \frac{h_{ms}}{4h'_s} \left(\frac{h_{ms}}{4h'_s} - 1 \right)^{-1}, \quad (2.42)$$

$$A_{h'_s} = \frac{-h_{ms}}{4h'_s} \left(\frac{h_{ms}}{4h'_s} - 1 \right)^{-1}, \quad (2.43)$$

$$A_t = \frac{-t(2h_{ms} - 0,8w)}{(0,8w + t)(2h_{ms} + t)} \left[\ln \left(\frac{1,9(2h_{ms} + t)}{0,8w + t} \right) \right]^{-1}, \quad (2.44)$$

$$A_\varepsilon = -\frac{1}{2} \quad (2.45)$$

В приложении В приведены примеры расчета коэффициентов влияния. При типовых значениях конструктивно-технологических параметров: $\varepsilon_r = 4,5$, $t = 0,035$ мм, $w = 0,05 \div 0,25$ мм, $h_{ms} = 0,073791 \div 0,172038$ мм, и при значении волнового сопротивления 50 Ом коэффициенты влияния для микрополосковой линии принимают значения, показанные в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Коэффициенты влияния параметров на волновое сопротивление

Класс точности	Значение коэффициента влияния параметров			
	A_w	A_{hms}	A_t	$A_{\varepsilon r}$
4	-0,52	0,79	-0,00475	-0,439
5	-0,502	0,78	-0,00331	-0,43
6	-0,496	0,76	-0,00186	-0,424
7	-0,494	0,74	-0,00779	-0,42

Точность полученных формул в области номинальных значений конструктивно-технологических параметров определяется точностью выбранных в п.2.3 из исходных инженерных формул. Имея аналитические выражения для расчета коэффициентов влияния можно перейти к расчетам вероятностных характеристик отклонений параметров печатных проводников от заданных допусков.

2.4. Методика и алгоритм расчета погрешностей волнового сопротивления от разброса геометрических размеров проводников

Существующие программы моделирования СВЧ соединений на ПП [99] дают возможность получать математические модели соединений, с высокой

точностью отражающие влияние геометрических параметров линий связи на физические процессы в схеме.

Advanced Design System (ADS) [68] – передовая САПР, являющаяся промышленным стандартом в области проектирования ВЧ/СВЧ устройств. С помощью ADS можно быстро и точно спроектировать как алгоритм работы радиоэлектронного устройства в среде *Ptolemy*, так и принципиальную схему и топологию. ADS предлагает полную интеграцию разработки приёмопередающих трактов, состоящих из различных типов ВЧ/СВЧ блоков (фильтров, смесителей, усилителей, ФАПЧ и т.п.). В САПР возможно проектировать и моделировать более сложные РЭУ: приёмопередающие устройства, коммуникационные системы различных электронных устройств, таких как сотовые и портативные телефоны, беспроводные сети, и спутниковые коммуникационные системы. Новые возможности открываются за счет интеграции программы ADS и измерительных приборов, это так называемые "взаимосвязанные решения". Этот способ разработки позволяет решать сложные задачи по проверке адекватности моделей устройств и управлять работой измерительного оборудования.

Программа расчета полосковых линий TXLine - часть пакета *Microwave Office* фирмы *Applied Wave Research* (AWR) [75]. Программный продукт *Microwave Office* (Микроволновый офис) разработан под операционную систему WINDOWS и PC совместимые компьютеры. Это наиболее доступная и широко распространенная платформа. Учтена специфика операционной системы и реализовано объектное программирование, поэтому достигнута высокая скорость вычислений и в режиме реального времени нет видимых задержек процесса моделирования схем. В *Microwave Office* (Микроволновый офис) пользователям предоставлены широкие возможности разработки ВЧ, СВЧ, КВЧ радиоэлектронных средств различного назначения и принципов их реализации. На микрополосковых, копланарных и полосковых типах линий, расположенных в одном или двух слоях, возможно использование готовых библиотечных элементов схем. Более сложные схемы можно конструировать самостоятельно.

На рисунке 2.3 показана структура традиционного подхода к проектированию ПП для высокочастотных и быстродействующих цифровых устройств. В его основе лежит тесное взаимодействие проектировщика схемы с конструктором узла на ПП. После моделирования определяется работоспособность изделия. Если конструкция работоспособна, можно перейти к изготовлению узла. В противном случае определяются необходимые для обеспечения параметров изменения ПП, и процесс разработки топологии повторяется.

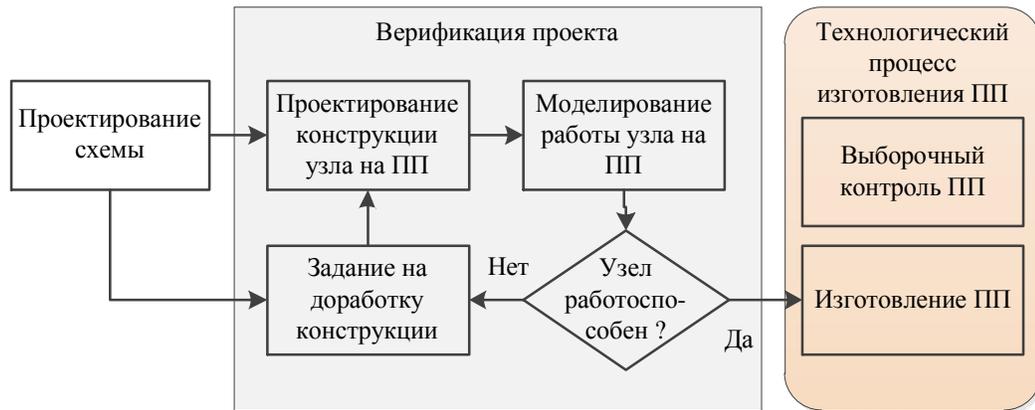


Рисунок 2.3 - Традиционный подход

Недостатком представленного подхода является отсутствие в проекте учета влияния допусков на отклонение параметров соединительных проводников от номинальных значений. Для низкочастотных схем и ПП низкой точности отсутствие допускового контроля параметров межсоединений мало влияет на результаты, полученные в производстве изделия. Для быстродействующих цифровых схем погрешности геометрических размеров проводников и параметров слоев платы сказываются на работоспособности схемы. ТП производства ПП с такими погрешностями приведет к повышению уровня брака или, что хуже, к появлению скрытых дефектов и снижению надежности изделия.

Поэтому перед запуском изделия в производство, после окончания проектирования необходимо убедиться не только в соответствии выходных параметров узла требованиям ТЗ, но и проверить возможность его производства с учетом требований к допускам на эти параметры. Если для относительно низкочастотных схем допусковые расчеты выполнялись только для параметров

элементов схемы, то при запуске в производство быстродействующих и высокочастотных схем требуется контроль пассивной части конструкции, т.е. необходимо контролировать уход конструктивно-технологических параметров ПП и межсоединений, которые оказывают влияние на выходные параметры узла.

Ниже рассмотрим метод учета влияния конструктивно-технологических параметров ПП и межсоединений, который позволит прогнозировать вероятность отказов из-за ухода волнового сопротивления за пределы допуска при изготовлении прецизионных ПП для узлов быстродействующих цифровых и СВЧ схем.

Ширина поля рассеивания погрешности выходного параметра $\Delta Z/Z$ с учетом сделанных выше допущениях на уровне $\pm 3\sigma$ рассчитывается, как корень квадратный из суммы квадратов допусков на погрешности параметров (формула 2.17).

Если (из требований к конструкции проектируемого узла) поле допуска волнового сопротивления равно $2 \cdot \Delta(\Delta Z/Z)$, то значение вероятности выхода за пределы поля допуска равно площади под кривой распределения в интервалах $\left(-\infty \div -\Delta\left(\frac{\Delta Z}{Z}\right)\right)$ и $\left(+\Delta\left(\frac{\Delta Z}{Z}\right) \div +\infty\right)$ (рисунок 2.4).

Если x – отклонение параметра от номинального значения, то вероятность попадания случайной величины x в заданный диапазон $(-\Delta x, +\Delta x)$ равна интегралу функции $f(x)$ по данному диапазону:

$$P\left(\Delta x^- < x < \Delta x^+\right) = \int_{\Delta x^-}^{\Delta x^+} f(x) dx, \quad (2.46)$$

Вероятность выхода за пределы допуска рассматривается, как обратная величина:

$$q\left(x < \Delta x^- \text{ и } x > \Delta x^+\right) = 1 - P\left(\Delta x^- < x < \Delta x^+\right) = 1 - \int_{\Delta x^-}^{\Delta x^+} f(x) dx, \quad (2.47)$$

Или, выражая вероятность через функцию Лапласа, получим:

$$q(x < \Delta x^- \text{ и } x > \Delta x^+) = 1 - 2\Phi\left(\frac{\Delta x}{\sigma}\right), \quad (2.48)$$

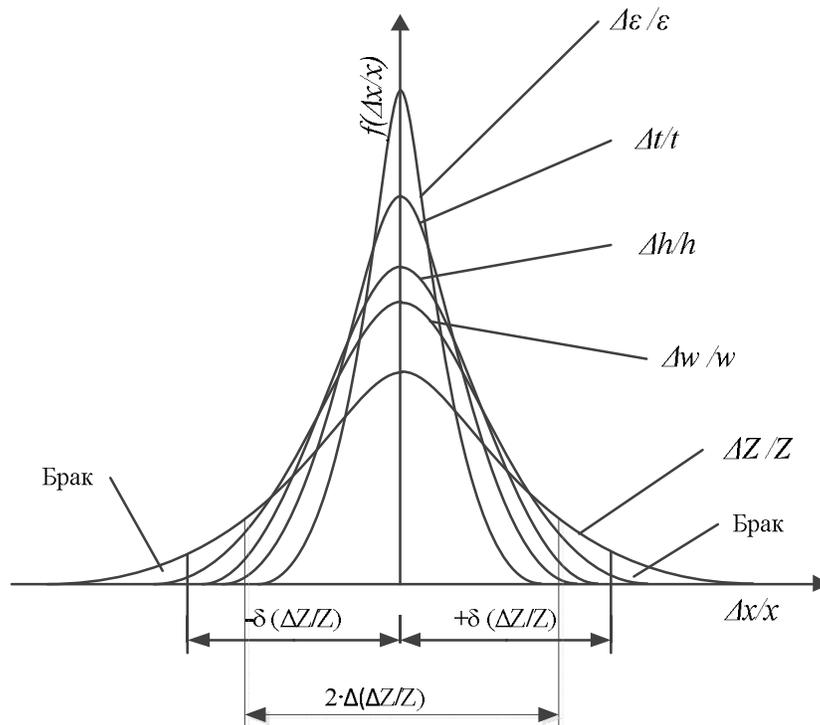


Рисунок 2.4 - Законы распределения погрешностей конструкции проводников ПП

Рассмотрим всю совокупность n проводников $\Gamma = \bigcup_{i=1}^n \gamma_i$ устройства на ПП, критичных к значениям волнового сопротивления Z . Пусть q_i – вероятность превышения значения допуска на волновое сопротивление Z_i проводника γ_i . Тогда вероятность нарушения допусков на отклонение волнового сопротивления будет:

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i) \quad (2.49)$$

Представленные аналитические выражения позволяют при проектировании ПП для СВЧ и быстродействующих цифровых устройств учитывать погрешности производства. Это должно привести к повышению надежности изделий и снизить количества некачественных ПП.

На рисунке 2.5 показана последовательность решения задач создания устройств на прецизионных ПП, при которой удастся прогнозировать уровень

параметрических отказов ПП по допускам с помощью расчета погрешностей ВС сигнальных проводников.

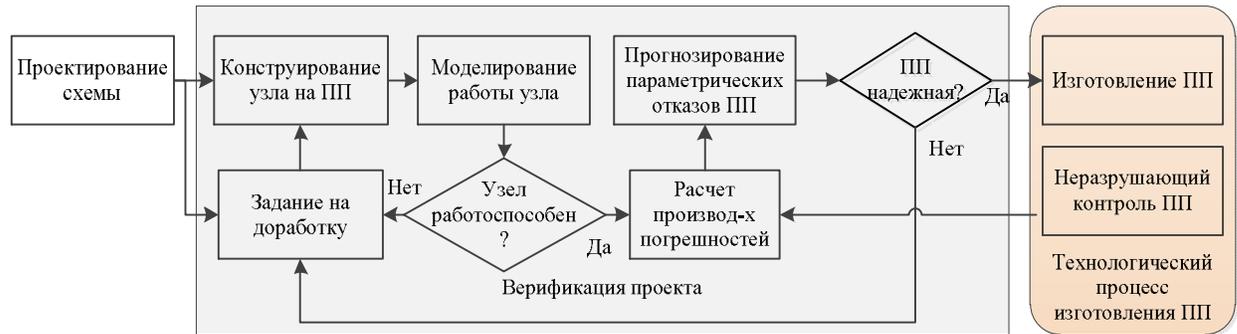


Рисунок 2.5 – Методика проектирование ПП с учетом ограничений по допуску

Существующий процесс проектирования (рисунок 2.3) дополнен циклом проверки надежности ПП по показателям выхода значений ВС за допуск по каждому сигнальному проводнику. Для всех сигнальных проводников выполняется расчет производственных погрешностей ВС (формула 2.17) и путем их сравнения с заданными проектировщиком допусками определяются вероятности выхода за поле допуска (формула 2.48). Затем по формуле (2.49) определяется надежность ПП.

В случае невыполнения требований к уровню надежности по параметру ВС определяются проводники, конструкция которых требует корректировки. Разработчик ПП в итерационном цикле редактирует топологию ПП, добиваясь снижения требований на допуски к проводникам за счет изменения топологии ПП, более тщательного согласования задержек сигналов, учета неоднородностей в межсоединениях. Другой альтернативой решения задачи повышения параметрической надежности ПП является переход к более точным технологиям изготовления ПП или коррекция существующего технологического процесса.

Методика прогнозирования показателей надежности ПП представлена на рисунке 2.6.

Исходными данными расчета являются данные о погрешностях ТП производства ПП и данные о параметрах конструкции. По данным о конструкции ПП определяются параметры w , t , h_s , h_{ms} , h_{ems} , h_s' , ε_r необходимые для расчета

коэффициентах влияния производственных погрешностей. В блок расчета относительной погрешности волнового сопротивления Z проводника поступают значения коэффициентов влияния A_i и производственных погрешностей параметров проводника $\frac{\Delta w}{w}, \frac{\Delta h_{ms}}{h_{ms}}, \frac{\Delta h_s}{h_s}, \frac{\Delta h_{ems}}{h_{ems}}, \frac{\Delta t}{t}, \frac{\Delta \epsilon_r}{\epsilon_r}$. Далее к расчету погрешности волнового сопротивления применяются формулу (2.17). Рассчитывается вероятность нарушения допуска на волновое сопротивление для сигнальных проводников (формула 2.48).

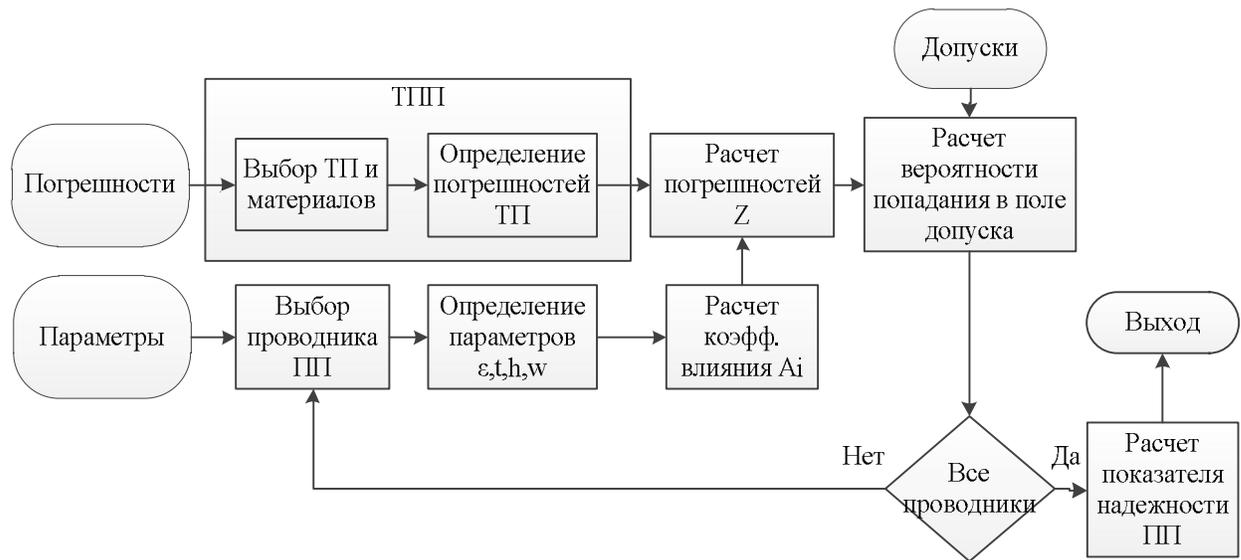


Рисунок 2.6 - Оценка ТП по критерию параметрической надежности

После завершения расчета вероятностей отклонения значений волнового сопротивления всех проводников, критичных к изменениям волнового сопротивления определяется допуск на погрешности волнового сопротивления всей ПП, рассчитывается вероятность нарушения допусков на волновое сопротивление, которая определяет надежность ПП по данному показателю и принимается решение о возможности применения выбранного ТП.

Межсоединения на ПП представляют неоднородные линии связи. Даже, если ПП разработана с учетом согласований волнового сопротивления проводников, на пути распространения сигнала обязательно встречаются неоднородности создающие емкостные и индуктивные нагрузки. Неоднородности вносят изменения в форму сигнала. Поэтому при проектировании необходимо контролировать возникающие в соединениях искажения.

В монографии Л.Н.Кечиева [47] приведены методы расчета влияния неоднородностей на изменения формы сигнала. В расчете учитываются емкостные и индуктивные неоднородности. Каждая неоднородность увеличивает задержку сигнала.

Емкостные неоднородности проявляются в виде входной емкости вентиля, собственной емкости контактных площадок, выводов микросхем, коротких отрезков проводников для подключения компонентов, поворотов сигнальных проводников, металлизированных отверстий. Время задержки сигнала на емкостной неоднородности C

$$\Delta t = 0,5 \cdot Z \cdot C, \quad (2.50)$$

Индуктивные неоднородности проявляются в металлизированных отверстиях, последовательных согласующих резисторах, соединителях. Время задержки сигнала на индуктивной неоднородности L

$$\Delta t = \frac{0,5 \cdot L}{Z}, \quad (2.51)$$

Как видно из формул 2.50 и 2.51 задержка сигнала на неоднородностях напрямую зависит от волнового сопротивления Z . Поэтому при проектировании линий связи необходимо учитывать погрешности Z , которые внесут существенные коррективы в расчетные значения задержек.

Для определения допуска на волновое сопротивление необходимо контролировать допустимые задержки сигнала. Эти задержки определяет длительность фронта сигнала. При $Z = 50 \text{ Ом} \pm 15\%$, и с неоднородностью 2 пФ постоянная времени задержки будет равна $\tau = 50Z \cdot C = 50 \pm 8 \text{ пс}$. По верхней границе задержка возрастает до 58 пс. Если неоднородностей несколько, то общая задержка суммируется. Отсюда следует, что в случае коротких фронтов (порядка 100 пс) погрешность может существенно повлиять на стабильность работы схемы.

В приложении Б приведен пример оценки влияния погрешности волнового сопротивления на задержки сигнала.

В разработанной методике проектирования запуску спроектированного узла в производство предшествует контроль качества и надежности ПП по

конструктивно-технологическим параметрам межсоединений с учетом возможностей выбранной технологии. Такой подход позволяет уменьшить вероятность появления отказов устройств после сборки из-за отклонения волнового сопротивления проводников от расчетных значений, благодаря чему:

- снижается риск появления в партии ПП некачественных образцов,
- уменьшаются затраты на дорогостоящий контроль параметров сигнальных проводников ПП в процессе производства,
- возрастает уровень надежности выпускаемых ПП.

Выводы по главе 2

1. С помощью САПР ADS2008 выполнено исследование точности предлагаемых в технической литературе приближенных аналитических выражений для расчета ВС печатных проводников, которое показало возможности их использования для моделирования влияния конструктивно-технологических параметров ПП на погрешности ВС. Выбранные для расчетов в диссертации аналитические выражения позволяют в области типовых значений параметров межсоединений ПП получать погрешности вычислений ВС для микрополосковых линий не более 0,35% в диапазоне классов точности с 4-го по 7-й, для полосковой линии: 0,66% (4-й класс точности), 2,13% (5-й класс точности), 3,5% (6-й класс точности) и 5,5 % (7-й класс точности).

2. Выбранные аналитические выражения расчета волнового сопротивления печатных проводников были использованы для вывода расчетных формул коэффициентов влияния погрешностей конструктивно-технологических параметров ПП на погрешность волнового сопротивления микрополосковой, полосковой, заглубленной и двойной полосковой линий связи ПП. С использованием полученных формул проведены расчеты коэффициентов влияния конструктивно-технологических параметров ПП на погрешность волнового сопротивления микрополосковой, полосковой, заглубленной и двойной полосковой линий связи ПП, которые показали значительное влияние ширины и толщины печатных проводников и диэлектрической проницаемости на

погрешность волнового сопротивления (более 10%).

3. Выполнен анализ воздействия погрешностей волнового сопротивления на работоспособность цифрового устройства на ПЛИС XC3S500E-4PQG208C при длительности импульсов 10 нс, который показал, что погрешности более 10% оказывают значительное влияние на величину задержки сигналов при наличии неоднородностей в сигнальных проводниках. В рассмотренном примере рассогласование линий передачи цифрового сигнала из-за погрешности волнового сопротивления превысило 400 пс, что выходит за пределы допустимых значений для микросхемы XC3S500E-4PQG208C. Это показывает необходимость учитывать конструктивно-технологические погрешности при проектировании ПП быстродействующих цифровых устройств.

4. На основе методов параметрической надежности радиотехнических устройств разработана *методика*, расширяющая возможности существующего подхода к проектированию ПП быстродействующих цифровых устройств в направлении учета влияния технологических процессов на показатели надежности прецизионных ПП и позволяющая:

- связать значения отклонения от допусков на контролируемое (при проектировании узла) волновое сопротивление печатных проводников с конструктивно-технологическими погрешностями параметров, формируемых в технологическом процессе производства прецизионных ПП;
- прогнозировать показатель надежности ПП по вероятности отказов быстродействующих цифровых устройств из-за конструктивно-технологических погрешностей параметров сигнальных проводников, возникающих в процессе производства прецизионных ПП;
- осуществлять прогнозирование возможностей производства ПП с заданными требованиями на допуски к погрешностям волнового сопротивления;
- снижать риски запуска в производство ПП с низкой надежностью по допускам на параметры межсоединений.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

3.1. Разработка способа неразрушающего контроля производственных погрешностей формирования проводников ПП

Тенденция развития печатных плат характеризуется уменьшением ширины проводников и увеличением количества межслойных переходов за счет уменьшения их размеров и использования поверхностных контактных площадок для присоединения выводов компонентов. Наиболее общими показателями уровня печатных плат являются ширина проводников и диаметр межслойных переходов. Уменьшение этих параметров способствует к значительному улучшению габаритных показателей устройств и, как следствие, повышению быстродействия цифровых схем за счет минимизации задержек сигналов в межсоединениях.

Наряду с положительными эффектами переход к минимальным технологическим нормам приводит к значительным осложнениям в создании надежных изделий. Если для ПП классов точности 1-4 погрешности воспроизведения геометрических размеров проводников и контактных площадок оказывали незначительное влияние на электрические параметры и сигналы схем, то при переходе к созданию ПП 5 класса точности и выше обязательно необходимо учитывать отклонения размеров от номиналов.

Создание прецизионных ПП требует организации высокотехнологичных дорогостоящих производств. Перспективные современные технологии позволяют создавать печатные платы с воспроизводимостью рисунка проводник/зазор менее, чем 0,02/0,02 мм [9]. Однако, остается нерешенным вопрос о сохранении на необходимом уровне основных электрических характеристик линий связи в печатных платах – электрической емкости и волнового сопротивления, которые непосредственно связаны с геометрическими размерами проводников [77].

В главе 2 разработана методика, осуществляющая прогнозирование и контроль производственных погрешностей при проектировании ПП и их влияния

на работоспособность быстродействующих цифровых устройств. Это позволяет уменьшить риски получения ненадежных изделий за счет учета влияния отклонений параметров проводников на электрические параметры схем.

Вопросы повышения надежности и качества постоянно находятся в центре внимания разработчиков и производителей прецизионных ПП. Хорошо отработанный проект ПП еще не дает полной гарантии получения качественного изделия, которое в достаточной степени определяется технологическими возможностями.

В условиях высоких требований к прецизионному производству ПП для снижения рисков появления брака появляется необходимость постоянного *оперативного* измерения уходов параметров технологических процессов. Методы разрушающего контроля не позволяют оперативно отслеживать изменения параметров ТП. Поэтому появляется необходимость разработки неразрушающих методов оперативного контроля.

Целью разработки данного параграфа диссертации является создание простого способа оперативного контроля, который позволил бы при мелкосерийном производстве с помощью существующих средств измерения электрофизических параметров печатных проводников оперативно определять погрешности их ширины.

В основе предлагаемого способа лежит известный метод измерения волнового сопротивления линий связи с помощью метода динамической рефлектометрии. Для контроля качества ПП инструмент, реализующий метод динамической рефлектометрии, подает на проводник положительный импульс. Импульс проходит до конца проводника и отражается обратно к измерительному пробнику. После обработки полученного сигнала с помощью алгоритмов метода динамической рефлектометрии производится дискретизация отраженного сигнала и вычисление импеданса тестового проводника. Результаты обрабатываются и отображаются на дисплее в виде численных значений и графика (рисунок 3.1).

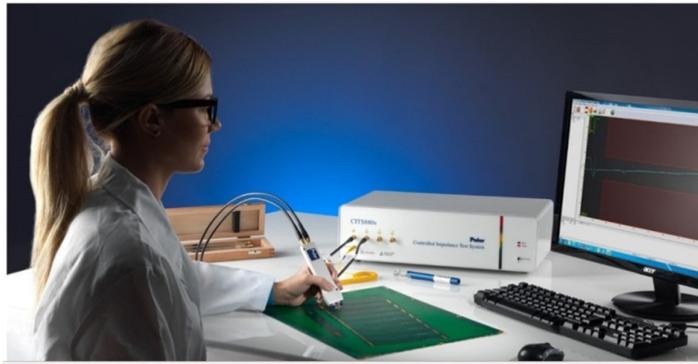


Рисунок 3.1 - Стенд контроля волнового сопротивления ПП [96]

Рефлектометры в настоящее время применяются совместно с программным обеспечением для расчета и анализа печатных плат с контролируемым импедансом.

В предлагаемом способе [32] измерение волнового сопротивления выполняется на тестовом образце ПП. Он является микрополосковой линией, не содержит неоднородностей, может быть адекватно рассчитан, прогнозируемо воспроизведен и в этой связи может быть использован как прямо-сдаточный элемент.

Для проведения проверки ВС, тестовый образец должен располагаться вне печатной платы на производственной заготовке. Конструкция слоев тестового образца показана на рисунке 3.2.

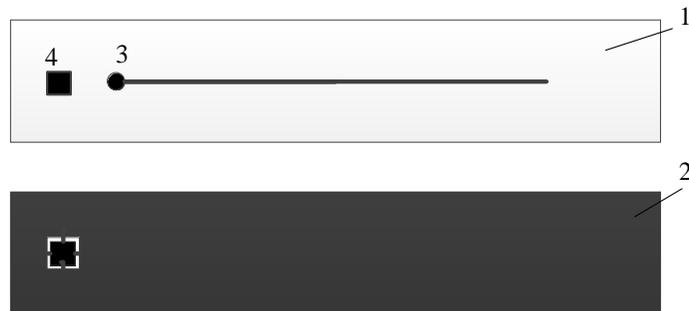


Рисунок 3.2 - Тестовый образец ПП. Послойный чертеж

Сигнальный проводник расположен в слое 1. Плоскость «земли» 2 имеет сплошное покрытие. Через квадратную контактную 4 площадку просверлено металлизированное отверстие для связи слоев. Печатный проводник на слое 1 связан с круглой контактной площадкой 3. Прямоугольная контактная площадка подключена через металлизированное отверстие к слою 2.

Размеры тестового образца определяются исходя из применяемой производителем технологии проверки ВС и выбранными аналитическими выражениями для расчета значения ВС проводников проектируемой ПП.

В основе способа лежит аналитические выражения для определения волнового сопротивления микрополосковой линии (рисунок 3.3), рассмотренные в главе 2, которые устанавливают зависимость волнового сопротивления от конструктивно-технологических параметров ПП $Z = f(w, h_{ms}, t, \epsilon_r)$.

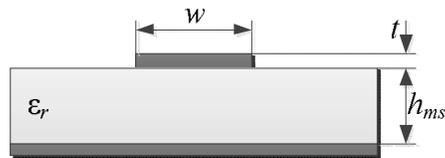


Рисунок 3.3 - Микрополосковая линия

Уравнение относительной погрешности для волнового сопротивления в этом случае будет

$$\frac{\Delta Z}{Z} = A_w \frac{\Delta w}{w} + A_h \frac{\Delta h_{ms}}{h_{ms}} + A_t \frac{\Delta t}{t} + A_{\epsilon} \frac{\Delta \epsilon_r}{\epsilon_r}, \quad (3.1)$$

Предполагается, что при изготовлении тестовых образцов строго контролируются диэлектрическая проницаемость основания печатной платы из стеклотекстолита, толщина фольги и основания печатной платы. Поэтому на формирование рисунка печатных проводников тестового образца относительные погрешности параметров $\frac{\Delta h_{ms}}{h_{ms}}$, $\frac{\Delta t}{t}$, $\frac{\Delta \epsilon_r}{\epsilon_r}$ не оказывают определяющего влияния и ими можно пренебречь. На погрешность волнового сопротивления в операции травления влияние окажет только разброс ширины проводника Δw . Поэтому в уравнении (3.1) оставим только одно слагаемое:

$$\frac{\Delta Z}{Z} \approx A_w \frac{\Delta w}{w}, \quad (3.2)$$

Отсюда следует аналитическое выражение для расчета относительной погрешности ширины проводников в зависимости от измеряемой погрешности волнового сопротивления:

$$\delta_w = \frac{\Delta w}{w} \approx \frac{\Delta Z}{Z \cdot A_w} = \delta_Z \cdot A_w^{-1}, \quad (3.3)$$

Зная значения коэффициента влияния A_w и, получив в результате измерения отклонение ВС от заданного значения, можно по формуле (3.3) рассчитать погрешность ширины проводников ПП после операции травления.

Измеряя погрешности волнового сопротивления проводников модулей по формуле 3.3 можно определить погрешности ширины проводников в результате подтравов на участке платы, занимаемом модулем.

Применение способа основано на известных методах измерения волнового сопротивления и не требует проведения прямых измерений отклонения ширины проводника от номинальных значений с помощью рентгеноскопии или разрушающего контроля, что значительно снижает стоимость и трудоемкость контроля.

3.2. Разработка стенда контроля ширины проводников ПП

Для реализации предложенного способа контроля ширины проводника по измеренным отклонениям волнового сопротивления тестового образца разработан стенд и устройство контроля [34].

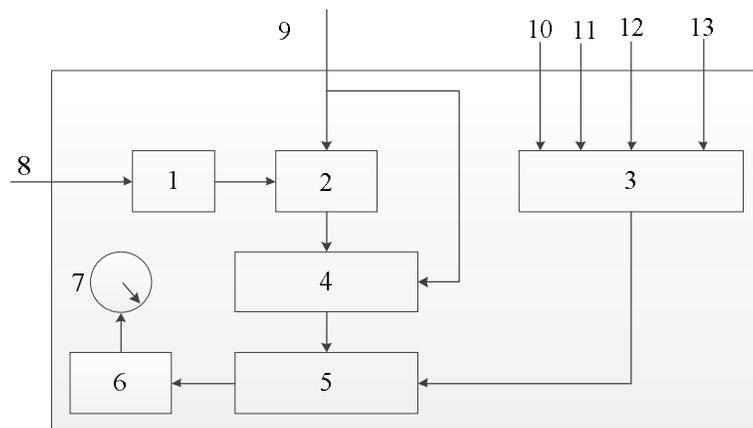


Рисунок 3.4 - Устройство вычисления погрешности ширины проводника

Главным компонентом стенда контроля является устройство вычисления погрешности ширины проводника (рисунок 3.4), которое состоит из аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 1, блока 2 вычисления абсолютной погрешности волнового сопротивления, блока 3 вычисления значения

коэффициента влияния погрешности ширины тестируемого проводника, блока 4 расчета относительной погрешности волнового сопротивления тестируемого проводника, блока 5 расчета значения погрешности ширины тестируемого проводника, адаптера 6 для перевода цифрового кода значения погрешности ширины тестируемого проводника в сигнал управления индикатором, индикатора 7 для вывода значения погрешности ширины тестируемого проводника. На аналоговый вход 8 устройства поступает сигнал, значение которого определяется измеренным волновым сопротивлением тестируемого печатного проводника, на группе входов 9 задается расчетное цифровое значение волнового сопротивления тестируемого проводника тестового образца ПП, на группе входов 10 задается цифровое значение ширины тестируемого печатного проводника тестового образца ПП, на группе входов 11 задается цифровое значение толщины печатной платы тестового образца, на группе входов 12 задается цифровое значение толщины слоя металлизации проводников печатной платы, на группе входов 13 задается цифровое значение диэлектрической проницаемости основания печатной платы, сигнал с входа 8 подается на вход АЦП 1, на первую группу входов блока 2 с выхода АЦП подается цифровой код измеренного значения волнового сопротивления тестируемого проводника тестового образца ПП, а на вторую группу входов из группы входов 9 подается цифровой код номинального значения волнового сопротивления тестируемого проводника тестового образца ПП, он также передается на вторую группу входов блока 4, на первую группу входов блока 4 передается цифровое значение абсолютной погрешности волнового сопротивления с группы выходов блока 2, на первую группу входов блока 3 с входов 10 подается расчетное значение волнового сопротивления тестируемого проводника тестового образца ПП, на вторую группу входов блока 3 с входов 11 подается значение толщины печатной платы тестового образца, на третью группу входов блока 3 с входов 12 подается значение толщины слоя металлизации проводников печатной платы, на четвертую группу входов блока 3 с входов 13 подается значение диэлектрической проницаемости основания печатной платы, на первую группу входов блока 5 с выходов блока 4 подается цифровое значение

относительной погрешности волнового сопротивления тестируемого проводника, на вторую группу входов блока 5 с выхода блока 3 передается цифровое значение коэффициента влияния погрешности ширины тестируемого проводника на относительную погрешность волнового сопротивления тестируемого проводника, на входы блока 6 с выхода блока 5 передается цифровое значение абсолютной погрешности тестируемого проводника, с выхода адаптера 6 на вход индикатора 7 поступает сигнал управления индикацией.

Блок 3 вычисляет значение коэффициента влияния A_w по формулам (2.19, 2.23, 2.27) из п. 2.3. Алгоритм расчета показан на рисунке 3.5.

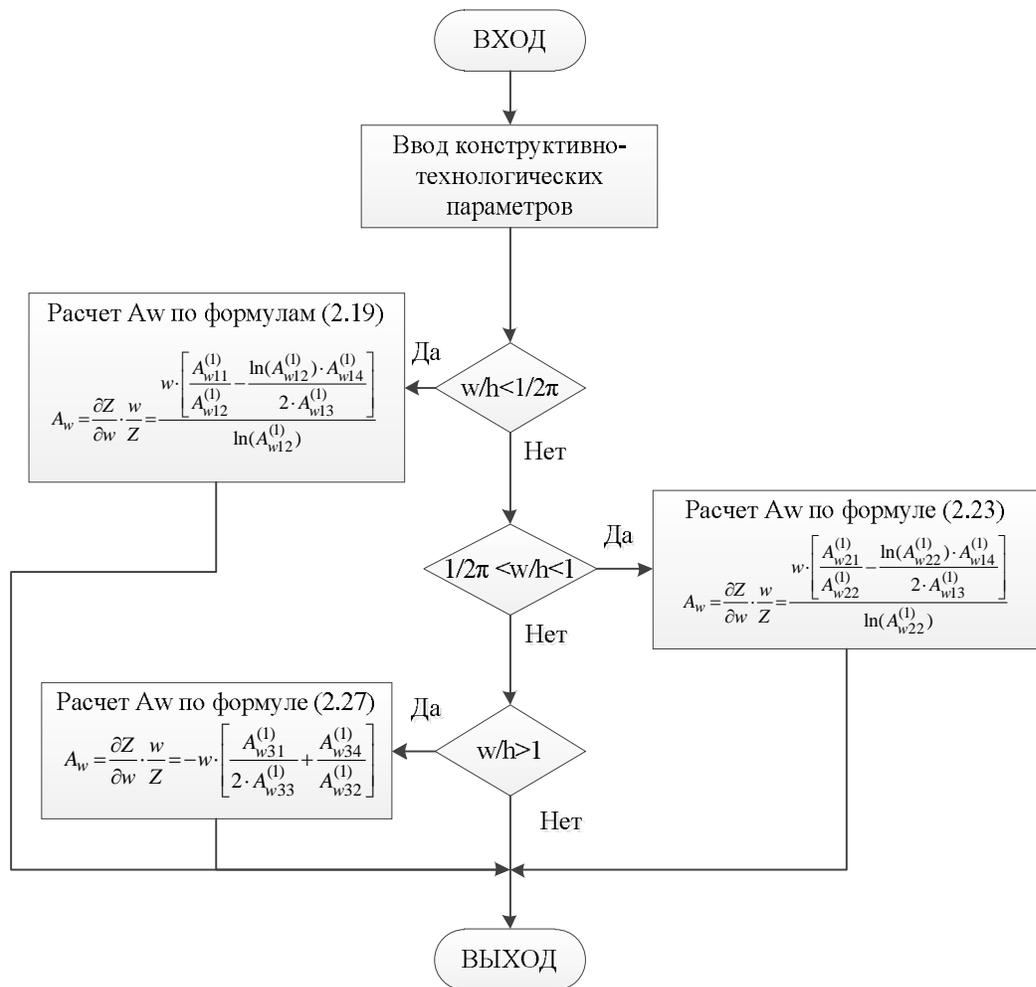


Рисунок 3.5 - Алгоритм расчета коэффициента влияния A_w

Рассмотрим работу устройства на примере измерения погрешности ширины печатного проводника тестового образца ПП (рисунок 3.2) с помощью стенда (рисунок 3.6), включающего динамический рефлектометр 20, тестовый образец

ПП с тестируемым проводником 21, блоки формирования цифровых кодов параметров тестового образца ПП 14, 15, 16, 17, 18 и устройство вычисления погрешности ширины проводников печатной платы 19.

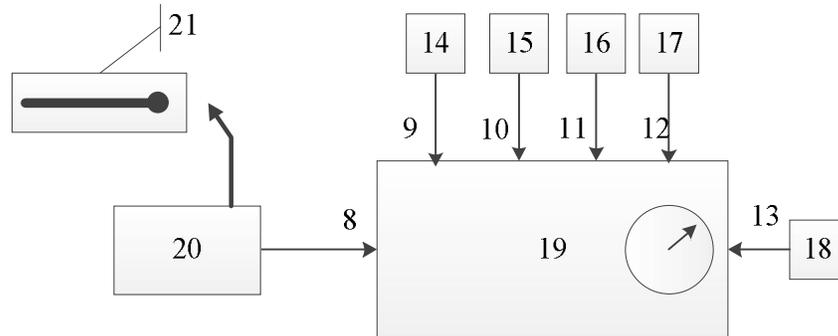


Рисунок 3.6 - Стенд контроля погрешности ширины проводников ПП

1. Динамическим рефлектометром 20 измеряется волновое сопротивление Z_t тестируемого проводника на тестовом образце ПП 21 (для измерения волнового сопротивления можно использовать, например, динамический рефлектометр MZPC30/50).

2. С динамического рефлектометра напряжение, определяемое значением волнового сопротивления поступает на вход 8 устройства.

3. К входам 9, 10, 11, 12, 13 устройства подключены блоки задания цифровых кодов значений параметров тестовой ПП и тестируемого проводника 14, 15, 16, 17, 18:

- На выходе блока 14 формируется цифровой код расчетного волнового сопротивления тестируемого проводника.
- На выходе блока 15 формируется цифровой код номинального значения ширины тестируемого проводника.
- На выходе блока 16 формируется цифровой код номинального значения толщины тестового образца ПП.
- На выходе блока 17 формируется цифровой код номинального значения толщины слоя металлизации тестового образца ПП.
- На выходе блока 18 формируется цифровой код номинального значения диэлектрической проницаемости основания ПП тестового образца.

4. На вход 9 устройства подается цифровой код из блока 14. На вход 10 устройства цифровой код подается из блока 15. На вход 11 устройства цифровой код подается из блока 16. На вход 12 устройства подается цифровой код из блока 17.

5. АЦП 1 (рисунок 3.4) преобразует аналоговый сигнал значения Z_t волнового сопротивления в цифровой код и передает его на вход разностной схемы (блок 2). На ее второй вход подается расчетное номинальное значение Z волнового сопротивления тестируемого проводника.

6. На выход блока 2 устройства (рисунок 3.4) поступает значение абсолютной погрешности в виде разности:

$$\Delta Z = Z_t - Z, \quad (3.4)$$

7. В блоке 4 устройства (рисунок 3.4) рассчитывается относительная погрешность:

$$\delta_Z = \frac{\Delta Z}{Z_0}, \quad (3.5)$$

8. В блоке 3 устройства (рисунок 3.4) по алгоритму (рисунок 3.6) рассчитывается коэффициент влияния ширины проводника на погрешность волнового сопротивления.

На выход блока 3 устройства (рисунок 3.4) подается вычисленное значение коэффициента влияния ширины проводника на абсолютную погрешность волнового сопротивления

$$A_{w\Delta}^{-1} = A_w^{-1} \cdot w, \quad (3.6)$$

9. В блоке 5 устройства (рисунок 3.4) выполняется расчет абсолютного значения погрешности ширины тестируемого проводника

$$\Delta_w = \delta_Z \cdot A_{w\Delta}^{-1}, \quad (3.7)$$

10. Найденное в блоке 5 устройства значение погрешности передается на вход адаптера 6, который формирует управляющие сигналы для индикатора значения погрешности 7 (рисунок 3.4).

Анализ, проведенный в п. 2.3 показывает, что точность вычислений по выбранным расчетных формул для микрополосковых линий не ниже 0,35 %, что

позволяет применять их в разработанном способе контроля погрешности ширины проводников.

Разработанный стенд позволяет осуществлять постоянный оперативный контроль погрешностей технологического процесса травления печатных плат. При мелкосерийном и опытном производстве такой стенд контроля позволит без применения дорогостоящих оборудования и систем управления многочисленными параметрами процесса высокоточного травления [52] [76] добиваться повышения стабильности технологического процесса производства прецизионных ПП.

По сравнению с оборудованием рентгеновской томографии стоимость предлагаемого варианта стенда сокращается с нескольких миллионов до десятков тысяч рублей. Трудоемкость контроля по сравнению с методами разрушающего контроля повышается 4-5 раз.

3.3. Разработка метода неразрушающего контроля погрешностей совмещения слоев на МПП

Контроль совмещения слоев МПП является сложным и дорогостоящим процессом, который требует, как показывает анализ существующих в настоящее время методов, применения специального оборудования и сложной технологической оснастки (см. п.1.3). *Целью* данного параграфа является разработка альтернативных подхода к контролю параметров совмещения слоев, который позволит снизить стоимость процесса и даст возможность более широкого внедрения контроля в мелкосерийных и опытных производствах.

В качестве основы разрабатываемого способа воспользуемся изложенном в государственном российском стандарте [15] и международном стандарте [100] способом контроля параметров межсоединений с помощью измерения параметров волнового сопротивления проводников МПП. Предлагаемый в стандартах способ не позволяет напрямую контролировать конструктивные параметры плат. Однако он указывает на возможности эффективного контроля электрофизических параметров печатных проводников.

Рассмотрим основные положения методики измерения волнового сопротивления с помощью тест-купона. Правила проектирования тест-купонов изложены в стандарте [15]:

a) использовать одну и ту же ширину проводника, толщину меди, толщину диэлектрика и тип диэлектрика, соответствующие плате;

b) в области купона опорные цепи должны быть непрерывны без разрывов, пустот, трещин или прерываний;

c) располагать купоны в зоне средних условий металлизации, прессования и травления;

d) на слое использовать единый номинал контролируемого волнового сопротивления линии передачи;

e) для вытравленного проводника допускается только одно значение контролируемого волнового сопротивления;

f) использовать одни и те же требования к паяльной маске для платы и купона;

g) не допускается наличия никакого проводящего материала в пределах 2,5 мм от купона (другие проводники, заполнение пустот медью, и т.д.);

h) опорные цепи должны быть соединены в области купона и изолированы от остальной области схемы (отделены от питания);

i) все слои должны быть идентифицированы на слое 1 в каждом конце вытравленного проводника;

j) проводящий рисунок должен находиться на расстоянии более 2,5 мм от испытываемых проводников. Допускается расположение непроводящего рисунка внутри области купона;

k) допускается идентифицировать контрольные точки питания/земли квадратными контактными площадками;

l) тест-купоны контролируемого волнового сопротивления, которые не могут быть разработаны в пределах законченной области схемы, должны иметь достаточную область для нанесения кода изготовителя, даты, серийного номера и номера партии;

m) проводники контролируемого волнового сопротивления в тест-купоне должны быть прямыми, кроме зоны 12,5 мм в области точки тестирования, в которой могут требоваться изгибы;

n) в области купона не допускаются соединения вспомогательных тепловых контактных площадок со слоями питания/земли;

o) если проводники на соседних слоях расположены перпендикулярно друг к другу, рисунок должен быть добавлен к купону, моделирующему пересечения в проводном монтаже. Рисунок проводников должен быть таким же, что и разработанная топология и должен включать пересечения токопроводящих цепей;

p) свободная зона вокруг линии контролируемого волнового сопротивления должна быть 0,25 мм и по длине - 2,5 мм;

q) минимальная длина линии контролируемого волнового сопротивления между двумя точками тестирования должна быть 150 мм;

r) если два проводника параллельны на одном и том же слое тест-купона, минимальное расстояние между их осями симметрии должно составлять 2,5 мм;

s) на каждом конце испытательной линии должны быть точки тестирования и контрольные точки (сквозные металлизированные отверстия (СМО) и контактные площадки).

Примеры отдельного теста-купона, выполненного по правилам, указанным выше, приведен на рисунке 3.7.

Идея предлагаемого способа контроля [33] базируется на исследовании волновых свойств проводников, расположенных на соседних металлизированных слоях МПП.

На рисунке 3.9 (а) представлена конструкция линии связи, в которой на двух соседних слоях друг над другом размещены параллельно сориентированные проводники.

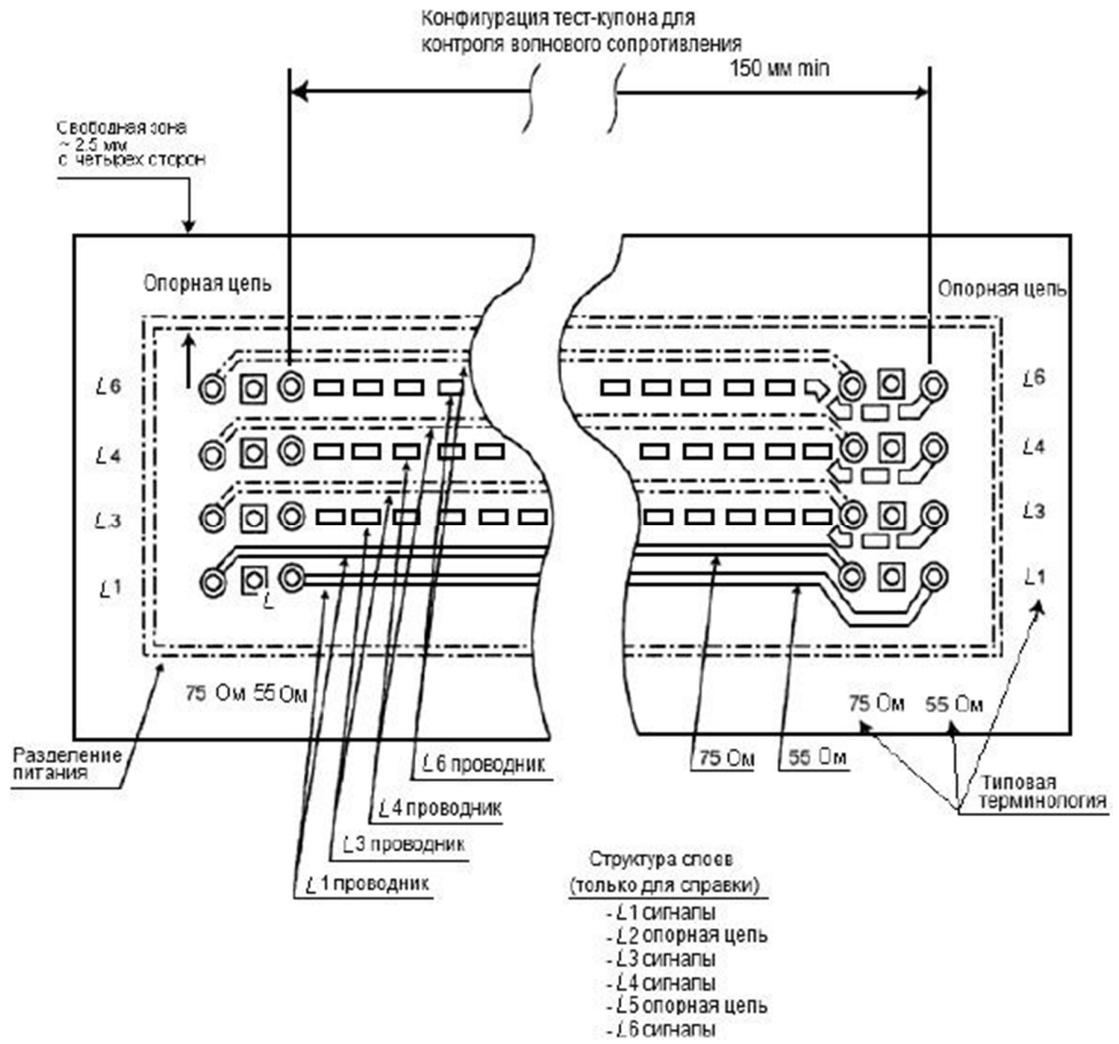
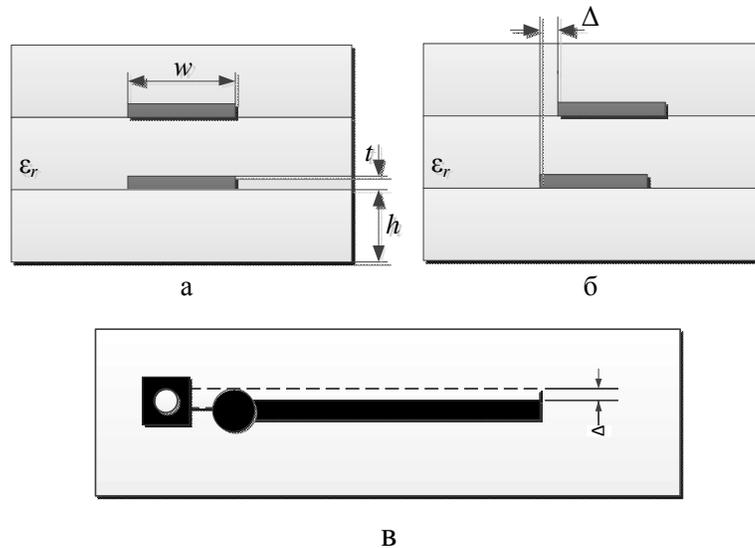


Рисунок 3.7 - Тест-кулон контролируемого волнового [15]

Рисунок 3.9 - Конструкция линии проводников: а) сечение проводников без смещения; б) сечение проводников при смещении Δ ; в) топология проводников

На концах проводников расположены две КП. Если к круглой КП подключить высокочастотный сигнал, а к квадратной (нижний проводник) подключить нулевой потенциал, то пара проводников образуют линию передачи, работающую в режиме холостого хода. Волновое сопротивление такой линии определяется погонной емкостью пары проводников относительно друг друга при условии отсутствия дополнительной металлизации в области их размещения.

С помощью САПР ADS2008 были проведены исследования волнового сопротивления пары проводников линии при подключении к одному из них сигнала и заземлении второго. При изменении смещения Δ от 0 до значения ширины проводника была построена зависимость волнового сопротивления от Δ .

График зависимости $Z=f(\Delta)$ величины импеданса Z полосковой линии связи показан на рисунке 3.10.

Как видно из графика функция $Z=f(\Delta)$ монотонно убывает при $\Delta \rightarrow 0$. Следовательно, в показанной выше конструкции из двух параллельных проводников при смещении одного проводника относительно другого волновое сопротивление возрастает. Это свойство использовано в предлагаемом способе контроля смещения слоев.

Для контроля смещения слоев на соседних слоях металлизации МПП создаются специальные тест-купоны, электрофизические свойства которых определяют параметры смещения.

Предлагаемая конструкция тест-купона для измерения смещения слоев состоит из $2n$ пар печатных проводников, ориентированных вдоль стороны МПП. Каждую пару проводников располагают на соседних слоях металлизации МПП один под другим с некоторым смещением δ_i в направлении перпендикулярном

стороне МПП. Пары проводников образуют два пересекающихся множества (группы): $P_I = \{p_0, p_{I1}, p_{I2}, \dots, p_{Im}\}$ и $P_{II} = \{p_0, p_{II1}, p_{II2}, \dots, p_{IIm}\}$. В паре p_0 проводники расположены без смещения. Для каждой следующей пары в группе смещение увеличивается на величину дискретного смещения Δ относительно смещения предыдущей пары. Для пар группы P_I смещения будут $(0, \Delta, 2\Delta, \dots, n\Delta)$. Для пар группы P_{II} смещения будут $(0, -\Delta, -2\Delta, \dots, -n\Delta)$.

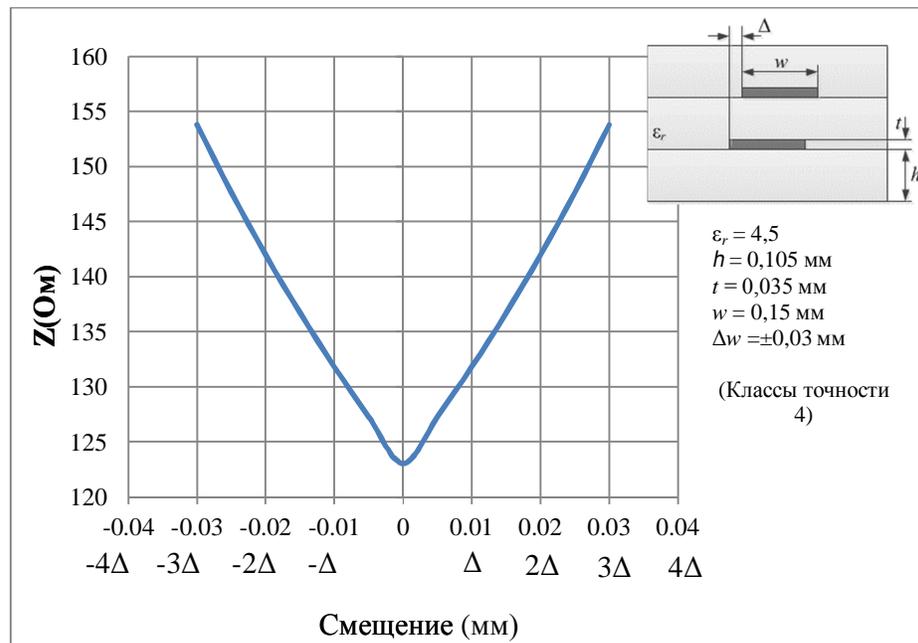


Рисунок 3.10 – График зависимости ВС от смещения Δ

Величина дискретного смещения Δ определяется минимальным разрешением $\delta_{i \min}$ выбранной технологии ПП ($\Delta \geq \delta_{i \min}$). Значение $n \cdot \Delta \leq w$, где w – ширина проводника.

В слоях, расположенных над и под тест-купоном в области размещения пар проводников металлизация отсутствует. Один конец первого из пары проводников тест-купона подключен через металлизированное отверстие к контактной площадке на верхнем слое металлизации МПП. Рядом с контактной площадкой первого проводника на верхнем слое металлизации МПП располагается контактная площадка для подключения через металлизированное отверстие второго проводника пары. Ширина проводников тест-купона должна быть больше максимального конструктивного смещения проводников в парах ($w > n \cdot \Delta$). Значение дискретного смещения Δ выбирается исходя из требуемой точности измерений. Количество пар проводников n выбирается из условия превышения максимальным смещением в парах проводников тест-купона значения допуска θ на смещение слоев МПП ($\theta \leq n \cdot \Delta$).

Пример структуры тест-купона с двумя парами проводников приведен на рисунке 3.11.

На рисунке 3.11 показаны области размещения тест купона в трех слоях металлизации верхнем слое 1, i -м слое 2 и $i+1$ -м слое 3. В области верхнего слоя 1 размещены контактные площадки 4, 5, 6, 7 для подключения пробника рефлектометра к тест-купону. Контактные площадки 6, 7 верхнего слоя через переходные отверстия связаны с контактными площадками 8, 9 проводников 10, 11 i -го слоя металлизации, контактные площадки 4, 5 верхнего слоя через переходные отверстия связаны с контактными площадками 12, 13 проводников 14, 15 $i+1$ -го слоя металлизации. Ширина проводников тест-купона w и длина (13-15 см) определяется исходя из заданного значения волнового сопротивления длинных линий, образованных парами проводников. Первая пара проводников 10 и 14 смещена относительно друг друга на величину Δ , вторая пара проводников 11 и 15 смещена в обратную сторону относительно друг друга на величину $-\Delta$. Величина смещения выбирается из условий: $\Delta \geq \delta_{i \min}$, где $\delta_{i \min}$ - минимальное разрешение выбранной технологии и $\Delta \leq w$, где w ширина каждого проводника в тест-купоне.

На рисунке 3.12 показаны совмещенный чертеж топологии тест-купона из шести пар проводников. В трех верхних парах проводники смещения будут: первая пара на Δ , вторая на 2Δ , третья на 3Δ . В трех нижних парах проводники смещения будут: первая пара на $-\Delta$, вторая на -2Δ , третья на -3Δ .

Величина смещения выбирается из условий: $\Delta \geq \delta_{i \min}$, где $\delta_{i \min}$ - минимальное разрешение выбранной технологии и $3\Delta \leq w$.

При увеличении количества пар проводников тест-купона правила выбора смещений Δ будут следующими: $\Delta \geq \delta_{i \min}$, $\theta \leq n \cdot \Delta \leq w$, где θ - значения допуска на смещение слоев МПП.

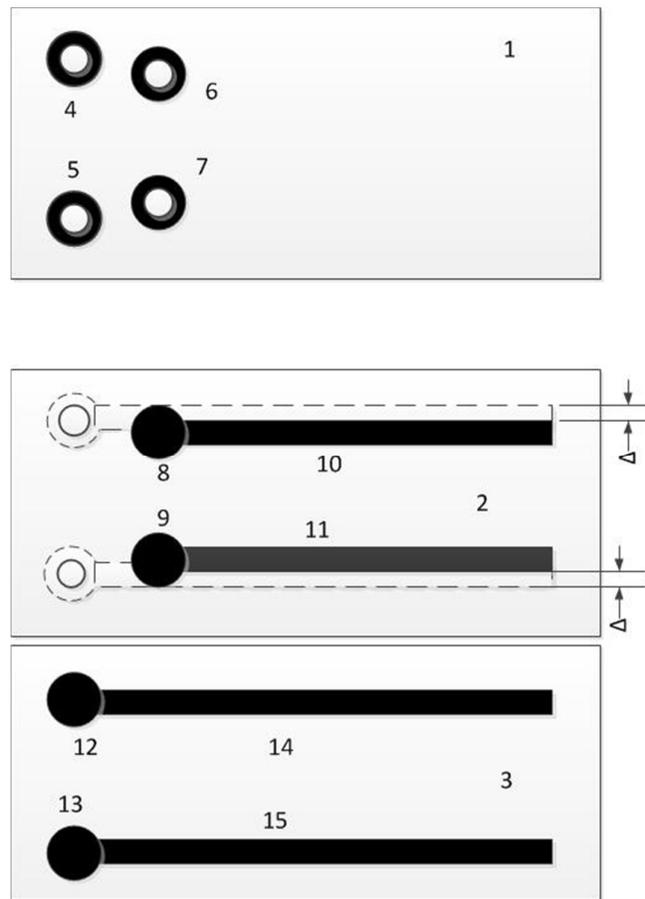


Рисунок 3.11 - Структура тест-купона с двумя парами проводников

Рассмотрим последовательность выполнения измерений смещения слоев с помощью разработанного тест-купона. Поставленная цель достигается тем, что на МПП изготавливают тест-купон, состоящий из пар печатных проводников, ориентированных вдоль стороны МПП. Каждую пару проводников располагают на двух соседних слоях металлизации МПП один под другим со смещением $i \cdot \Delta$ в направлении перпендикулярном стороне МПП. К одному из каждой пары проводников с помощью пробника подключают прибор для измерения волнового сопротивления (рефлектометр). К другому проводнику пары с помощью пробника рефлектометра подключают нулевой потенциал. Выполняют измерение волнового сопротивления сигнальных проводников каждой пары. Выбирают пару проводников с минимальным значением волнового сопротивления. По значению заданного для выбранной пары исходного смещения сигнального и заземленного проводников определяют смещение слоев МПП, в которых находятся проводники в направлении перпендикулярном проводникам тест-купона.

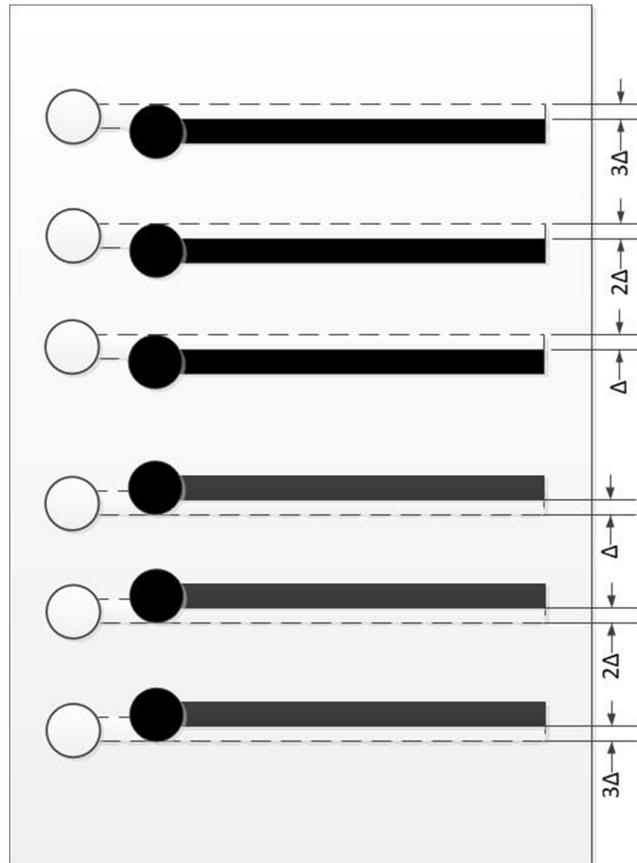


Рисунок 3.12 - Совмещенный чертеж топологии тест-купона из шести пар проводников

Способ определения и контроля величина смещения слоев металлизации МПП осуществляется следующим образом.

1. На МПП вместе с проводниками схемы устройства в проверяемых слоях металлизации изготавливают тест-купоны в виде $2n$ пар проводников параллельных стороне МПП.
2. К контактным площадкам каждой пары проводников тест-купона поочередно подключаются пробника динамического рефлектометра и измеряют волновое сопротивление каждой пары проводников.
3. Выбирают пару проводников, имеющих минимальное волновое сопротивление.
4. По данным конструкции тест-купона определяют заданное смещение δ выбранной пары проводников относительно друг друга.

5. По найденному значению смещения пары проводников δ определяют смещение контролируемых слоев МПП относительно друг друга в направлении перпендикулярном выбранной стороне МПП.

6. Для контроля смещения в направлении перпендикулярном второй стороне МПП на контролируемых слоях изготавливают тест-купон с проводниками параллельными второй стороне МПП.

7. Выполняют измерения по пунктам 2-5 и принимают решение о смещении контролируемых слоев относительно друг друга.

Применение способа не требует проведения визуальных измерений смещения слоев МПП под воздействием погрешностей технологического процесса прессования и систем машинного зрения, позволяет оперативно контролировать параметры технологического процесса изготовления печатных плат, что выгодно отличает предлагаемое техническое решение от существующих трудоемких и дорогостоящих способов контроля.

Перечисленные отличительные признаки способа позволяют снизить стоимости оборудования, уменьшить сложность процесса измерений и обработки результатов контроля.

Выводы по главе 3

1. На основе метода измерения волнового сопротивления линий связи с помощью метода динамической рефлектометрии и разработанных методов прогнозирования погрешностей проводников (п.3.1) предложен способ неразрушающего контроля ширины проводников с помощью измерения отклонений волнового сопротивления проводника на тестовом образце печатной платы [32] [34], который не требует проведения прямых измерений отклонения ширины проводника от номинальных значений с помощью рентгеноскопии или разрушающего контроля, что значительно снижает стоимость и трудоемкость контроля.

2. Предлагаемый способ измерения отклонения ширины печатных проводников от номинальных значений применим для оперативного контроля

технологической операции травления печатных плат при мелкосерийном и опытном производстве ПП, когда стоимости внедрения и выполнения операции контроля имеют определяющее значение.

3. С учетом исследованной в главе 2 точности применяемых в вычислениях формул расчета волнового сопротивления микрополосковых линий точность оценки погрешности ширины проводника должна составить около 0,35%.

4. На основе разработанных методов прогнозирования погрешностей проводников (п.3.1) предложен способ неразрушающего контроля смещения слоев МПП [33], в котором вдоль каждой стороны располагаются тест-купоны в виде печатных проводников, расположенных на каждой паре тестируемых слоев, погрешность определяется измерением волнового сопротивления проводников тест-купона. Применение способа не требует проведения визуальных измерений смещения слоев МПП под воздействием погрешностей технологического процесса прессования и систем машинного зрения, позволяет оперативно контролировать параметры технологического процесса изготовления печатных плат, что выгодно отличает предлагаемое техническое решение от существующих трудоемких и дорогостоящих способов контроля.

5. По сравнению с оборудованием рентгеновской томографии стоимость предлагаемых способов неразрушающего контроля сокращается с нескольких миллионов до десятков тысяч рублей. Трудоемкость контроля по сравнению с методами разрушающего контроля повышается 4-5 раз.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИХ ДОПУСКОВЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ СБОРОЧНО- МОНТАЖНЫХ ОПЕРАЦИЯХ КОМПОНЕНТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

4.1. Методы расчета погрешности смещений компонентов при монтаже на поверхности ПП

Переход к SMT технологиям приводит к ужесточению условий выполнения сборочно-монтажные операции. Повышение доли бракованных и ненадежных изделий при сборке связано с особенностями ТП: требованиями высокой производительности сборочных автоматов, сложностью монтажа микроминиатюрных компонентов. В результате смещения компонентов при установке на ПП происходит смещение выводов относительно контактных площадок (КП), которое приводит к снижению надежности паяных соединений и повышению вероятности коротких замыканий. Смещение выводов является причиной дефектов монтажа, которые влияют как на работоспособность схемы на выходе сборочно-монтажного производства, так и на надежность при эксплуатации изделия. Последнее является наиболее опасным событием, т.к. приводит к общему снижению надежности аппаратуры.

Для обеспечения надежного контакта паяных соединений в ГОСТ 53429-2009 [19] определены правила расчета геометрических размеров КП.

Например, наименьший номинальный размер КП (мм) для установки поверхностно-монтируемого изделия электронной техники (ПМИЭТ) рассчитывается по формулам:

$$M_k = b_{k\max} + \sqrt{T_{\text{Э}}^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{н.о}}^2}, \quad (4.1)$$

$$N = P + Q_{\text{П}} + \Delta l + \sqrt{T_D^2 + \Delta t_{\text{н.о}}^2}, \quad (4.2)$$

где, M_k – ширина КП, мм; N – длина КП, мм;

$b_{k\max}$ – максимальная ширина контактирующего элемента ПМИЭТ по техническим условиям на ПМИЭТ конкретного типа, мм;

T_D - позиционный допуск расположения геометрического центра корпуса устанавливаемого ПМИЭТ относительно номинального положения, определяемый используемым оборудованием, мм;

$\Delta t_{н.о}$ - нижнее предельное отклонение размеров элементов конструкции (ширины контактной площадки), мм;

Δl - верхнее предельное отклонение длины контактирующей части устанавливаемого ПМИЭТ по техническим условиям на ПМИЭТ конкретного типа (далее – техническое условие (ТУ) на конкретный тип), мм;

R - минимальное расстояние от края контактной площадки до контактирующей части ПМИЭТ, необходимое для обеспечения пайки надлежащего качества, устанавливаемое равным 0,3 мм при пайке паяльной пастой и 0,6 мм - при пайке припоем, мм;

$Q_{П}$ - гарантированный размер контактной площадки, необходимый для совмещения с контактирующей частью ПМИЭТ, устанавливаемый равным от 0,1 до 0,3 мм.

В формулах (4.1) и (4.2) слагаемые слева от корня определяются конструктивными параметрами компонента. Подкоренное выражение определяется погрешностями технологического процесса сборки. Чаще это погрешности, вносимые сборочными автоматами.

В ГОСТ ИЕС 61188-5-2-2013 [16] приводятся предельные допустимые размеры посадочных мест для типовых конструкций компонентов при поверхностном монтаже. В нем установлены допустимые значения (*min* и *max*) контактных площадок. Зная тип компонента можно из справочных таблиц выбрать размеры КП в зависимости от требуемой плотности монтажа.

Стандарт ГОСТ Р МЭК 61188-5-1-2012 [20] определяет 3 уровня для размеров контактных площадок. Уровень 1: *Maximum* - для модулей с низкой плотностью монтажа. Уровень 2: *Median* - для модулей со средней плотностью монтажа. Уровень 3: *Minimum* - для модулей с высокой плотностью монтажа. Повышение плотности монтажа достигается за счет уменьшения размеров КП и ограничений площади посадочного места. В тоже время меньшие размеры КП

приведут, согласно правилам определения недопустимых состояний установки компонентов, к снижению надежности паяных соединений.

В стандарте IEC 61188 для каждого типа корпусов определены допустимые параметры посадочных мест. Каждое посадочное место варьирует размеры в зависимости от выбранной плотности монтажа. На рисунке 4.1 приведен пример низкопрофильного пластмассового плоского корпуса с четырехсторонним расположением выводов (PLQFP). Посадочное место для этого корпуса показано на рисунке 4.2. Размеры корпуса и посадочного места приведены в таблице 4.1 и 4.2.

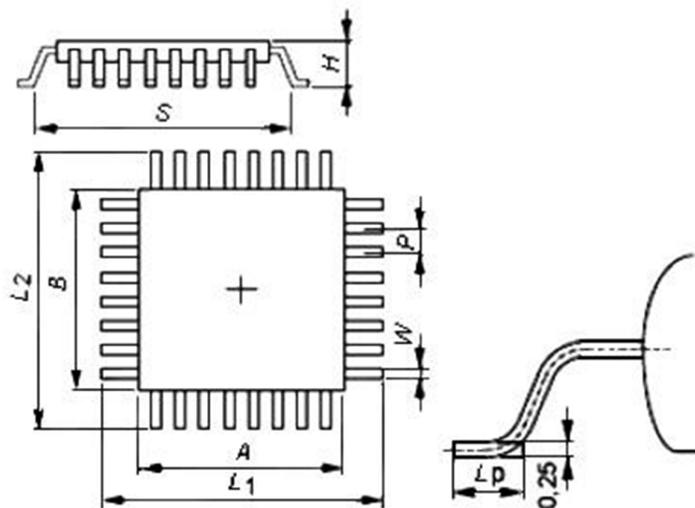


Рисунок 4.1 - Размеры корпуса типа PLQFP (квадратного)

Таблица 4.1 - Размер корпуса PLQFP (квадратного)

В миллиметрах

Код корпуса по EIAJ	Код корпуса по JEDEC	L_2		L_1		L_p		W			S^*		B	A	P	H
		min	max	min	max	min	max	min	nom	max	min	max				
P-LQFP-0032-0505-0,50	P-LQFP/032-5x5-0,50	6,80	7,2	6,80	7,2	0,45	0,75	0,17	0,20	0,23	5,3	5,88	5,0	5,0	0,50	1,20

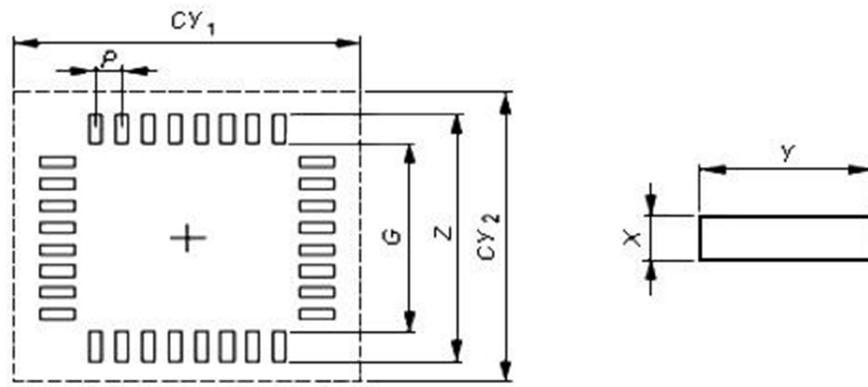


Рисунок 4.2 - Размеры посадочного места корпуса PLQFP

Таблица 4.2 - Размеры посадочного места корпуса PLQFP

В миллиметрах

Код корпуса по EIAJ	Код корпуса по JEDEC	Z	G	X*	Y	P	CY ₁	CY ₂
P-LQFP-0032-0505-0,50	P-LQFP/032-5x5-0,50	Уровень 1						
		8,4	5,0	0,33	1,7	0,50	10	10
		Уровень 2						
		8,0	5,0	0,33	1,5	0,50	8,5	8,5
		Уровень 3						
		7,5	5,0	0,25	1,25	0,50	7,7	7,7

Как видно из таблицы 4.2 размеры КП X и Y варьируются от 0,25 до 0,33 мм по ширине и от 1,25 до 1,7 по длине. При этом ресурс трасс через посадочное место изменяется.

В ГОСТ 53429-2009 [19] приводится формула для расчета наименьшего номинального расстояния L для прокладки n -го числа проводников,

$$L = \frac{D_1 + D_2}{2} + t \cdot n + S(n+1) + T_1, \quad (4.3)$$

где D_1, D_2 - диаметры окружностей, вписанных в контактные площадки с формой, отличной от круглой, мм; t - ширина проводника, мм; S - расстояние между краями соседних элементов проводящего рисунка, мм; T_1 - позиционный допуск расположения элемента проводящего рисунка, мм.

Размеры D_1 и D_2 могут варьироваться в зависимости от требуемого уровня плотности. Уменьшая размеры КП, конструктор получает дополнительные ресурсы для трассировки соединений [44] [58].

Дополнительный ресурс магистралей очень важен для повышения качества конструкции ПП. Например, можно уменьшить количество слоев при минимальной заданной площади ПП или сократить длину сигнальных проводников.

С другой стороны, при уменьшении размеров КП возрастает вероятность брака или возникает необходимость приобретения более дорогостоящего монтажно-сборочного оборудования для обеспечения уровня надежности паяных соединений. Необходимость нахождения баланса между разнонаправленными требованиями приводит к задаче оптимизации.

Рассмотрим, как влияют размеры КП на выполнение допусков по точности монтажа. Для расчета точности установки SMD-компонентов в работе [51] предложена модель, в которой смещение выводов относительно контактных площадок по осям координат иллюстрирует рисунок 4.3.

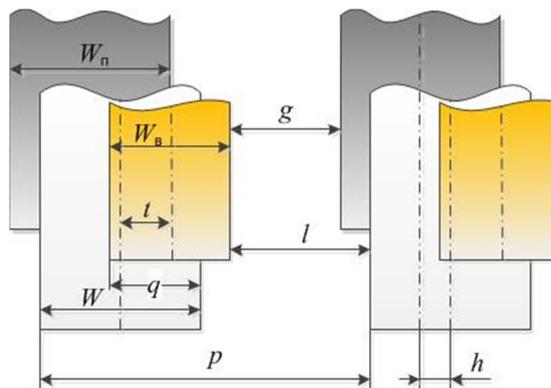


Рисунок 4.3 - Смещение выводов компонента относительно планарных контактных площадок вдоль сторон печатной платы: p — шаг выводов; W — ширина контактной площадки; W_B — ширина вывода; l — минимальный зазор исходя из требований изоляционной прочности; q — ширина перекрытия выводом контактной площадки; f — погрешность позиционирования вывода (в направлении X); $W_{\text{П}}$ — ширина площадки, занимаемая пастой; g — расстояние от

вывода до следующей площадки пасты; h — погрешность позиционирования припойной пасты (рисунок из [51])

Точность позиционирования компонентов на плату при поверхностном монтаже зависит от следующих основных факторов:

- Характеристики погрешностей автоматов укладчиков, которые имеют допуски на установку компонентов (0,0508–0,127 мм); на центровку корпуса — 0,0254 мм; на воспроизводимость укладки — 0,0254 мм; на позиционирование платы — 0,0254 мм.

- Допуск на изготовление печатной платы, включая изготовление фотошаблонов; погрешность механической обработки; изменение механических свойств и размеров платы за счет внешних воздействий (тепловое расширение, коробление во время пайки).

- Допуск на смещение выводов компонентов относительно корпуса (0,0254–0,1016 мм).

Сложение этих допусков может привести к суммарной погрешности позиционирования в пределах 0,254–0,3048 мм, что приемлемо для монтажа простых SMD. Для установки более сложных корпусов (SO, PLCC, QFP и др.) такой точности оказывается недостаточно при шаге выводов 1,25 или 0,635 мм [51].

Допуск позиционирования можно оценить исходя из геометрических размеров контактных площадок, выводов компонентов и возможных их отклонений.

В методике расчета [51] учитывается позиционирование припойной пасты и вывода компонента относительно контактной площадки с соответствующими индексами. На схеме (рисунок 4.3) площадка припойной пасты смещена влево, а вывод — вправо. При расположении их по центру контактной площадки эти погрешности будут равны 0, то есть $f = h = 0$.

Для оценки точности позиционирования используют три критерия:

1) Минимальное расстояние по прочности изоляции:

$$f_x < p - 1/2W_B - 1/2W - l, \quad (4.4)$$

2) Минимальная ширина зоны перекрытия:

$$f_x < 1/2W_B + 1/2W - g, \quad (4.5)$$

3) Точность нанесения припойной пасты:

$$f_x < p - 1/2W_{II} - 1/2W_B - h - l, \quad (4.6)$$

Уравнение (4.6) имеет смысл, когда припойная паста выступает за пределы контактной площадки.

Данная модель требует знания минимального зазора, исходя из требований изоляционной прочности и минимального расстояния от вывода до следующей площадки пасты. Для получения оценки при выборе технологии сборки данная модель излишне детализирована, использует параметры, которыми не всегда располагает разработчик. Ряд параметров (погрешность позиционирования припойной пасты, минимальный зазор исходя из требований изоляционной прочности) при выборе технологии не всегда можно заранее получить. Поэтому предпочтение будет отдано методике оценки допусков из ГОСТ Р МЭК 61191-2-2010 [22].

Для оценки нарушений в установке компонентов на ПП необходимо определить в соответствии с ГОСТ степень смещения выводов относительно КП. Исходными данными расчетов являются размеры КП, размеры проекции контактных поверхностей выводов на КП и координаты выводов относительно КП.

Оценим величину смещения по одной из осей системы координат Oy , вдоль линейки координатных площадок и без учета угловой составляющей погрешности совмещения.

В [4] предлагается учитывать четыре фактора, влияющих на смещение выводов компонента относительно КП: d_K – погрешность расположения вывода по отношению к центру корпуса компонента; d_R – погрешность расположения контактной площадки по отношению к элементу базирования на печатной плате; d_C – погрешность расположения центра захватного устройства автомата и центра корпуса компонента; d_M – погрешность между элементом базирования на печатной плате и центром системы координат механизма перемещения автомата;

d_T – погрешность перемещения компонента от места захвата до места установки на ПП. Суммарная погрешность установки компонента будет:

$$d_{\Sigma} = d_K + d_R + d_C + d_M + d_T, \quad (4.7)$$

Усредненные значения указанных погрешностей приведены в таблицах 4.3...4.7.

Таблица 4.3 – Усредненные значения погрешности расположения выводов к центру корпуса [4]

Шаг выводов ИМС, D , мм	Допустимая величина погрешности, S_D , мм	Половина поля допуска, d_K , мм
0,3	0,05	0,01
0,4	0,14	0,015
0,5	0,19	0,05
0,625	0,28	0,07
1,25	0,5	0,12

Таблица 4.4 – Усредненные значения погрешности расположения контактных площадок ПП [4]

Метод обеспечения точности рисунка платы	Половина поля допуска, d_R , мм
1. Трафаретная печать	0,12
2. Трафаретная печать повышенной точности	0,07
3. Фотолитография с жидким фоторезистором	0,05
4. Фотолитография с сухим пленочным фоторезистором	0,015
5. Фотолитография с сухим фоторезистором, повышенной точности	0,01

Таблица 4.5 – Усредненные значения погрешности захвата [4]

Вид захватного устройства	Половина поля допуска, d_C , мм
1. Без центрирующего устройства	0,12
2. С механическим центратором	0,08
3. С использованием системы технического зрения	0,05
4. С использованием системы технического зрения повышенной точности	0,01

Таблица 4.6 – Усредненные значения погрешности базирования ПП [4]

Метод базирования	Половина поля допуска, d_M , мм
1. По базовым отверстиям	0,1
2. По базовым отверстиям повышенной точности	0,06
3. По периферийным знакам совмещения	0,03

Таблица 4.7 – Усредненные значения погрешности перемещения компонента и ПП автоматом [4]

Метод базирования	Половина поля допуска, d_T , мм
1. На основе T-схемы	0,1
2. На основе линейного пошагового двигателя	0,05
3. На основе H-схемы	0,01

Усредненные значения погрешности перемещения компонента и ПП автоматом оцениваются в пределах от 10 до 100 мкм и зависят от типа установки [4].

Значения перечисленных погрешностей являются факторами, влияющими на погрешность установки компонента. Выбирая новую технологию или оценивая

возможности существующей технологии можно решать задачи оптимизации с учетом требований надежности монтажа. При этом прогнозирование выполнения требований допусков установки компонентов на ПП становится одним из условием решения следующих задач:

- проектирование узлов РЭА на ПП;
- выбор изготовителя ПП и монтажа компонентов;
- создание собственного сборочно-монтажного производства.

В перечисленных задачах необходимо, зная характеристики технологического процесса, гарантировать заданный уровень качества и надежности монтажа компонентов.

Для получения уравнения относительной погрешности разделим левую и правую часть выражения (4.7) на ширину вывода W :

$$\frac{d_{\Sigma}}{W} = \frac{d_K}{W} + \frac{d_R}{W} + \frac{d_C}{W} + \frac{d_M}{W} + \frac{d_T}{W}, \quad (4.8)$$

Каждая из перечисленных погрешностей определяется множеством независимых факторов технологического и конструктивного характера. Поэтому считается, что все перечисленные относительные погрешности подчиняются нормальному закону распределения с нулевым смещением и с полем допуска на уровне $\pm 3\sigma$. В справочной литературе и в технической документации обычно приводятся значения величины поля допуска на погрешности параметров установки. При этом точность, указанная в технической спецификации автомата, привязана к случайной составляющей погрешности установки на уровне $\pm 3\sigma$ [42] [45]. Принимая во внимание такое допущение, можно суммарную погрешность установки компонентов рассчитывать как среднеквадратичное отклонение, полученное путем суммирования допусков на составляющие погрешности:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_K^2 + \delta_R^2 + \delta_C^2 + \delta_M^2 + \delta_T^2}, \quad (4.9)$$

где допуски $\delta_K = \frac{d_K}{W}$; $\delta_R = \frac{d_R}{W}$; $\delta_C = \frac{d_C}{W}$; $\delta_M = \frac{d_M}{W}$; $\delta_T = \frac{d_T}{W}$.

Далее при прогнозировании погрешностей установки компонентов смещенные оценки учитывать не будем, т.к. они устраняются на этапе

производства путем внесения соответствующих поправок в координаты при программировании установочного автомата.

В результате ошибок захвата компонентов и высокой скорости перемещения захватывающих головок может произойти поворот компонента и его неправильная ориентация на плате. Компоненты с большим количеством выводов очень чувствительны к угловым смещениям. Например, поворот на один градус корпуса PLCC с 84 выводами приводит к смещению крайнего вывода на величину 0,254 мм.

Рассмотрим задачу прогнозирования таких дефектов.

Предположим, что компонент имеет центральную симметрию. На рисунке 4.4 показано расположение крайних контактных площадок компонента. Прямая линия, проведенная из геометрического центра компонента до дальнего угла крайнего верхнего вывода отклонена от горизонтальной оси симметрии на угол θ .

Значение координаты крайней точки вывода относительно центра симметрии будет:

$$y = r \cdot \sin \theta, \quad (4.10)$$

$$r = \frac{\sqrt{l_x^2 + l_y^2}}{2}, \quad (4.11)$$

где r - расстояние от центра симметрии компонента до дальнего угла контактной площадки (радиальный габарит компонента), мм; l_x и l_y - размеры прямоугольника, внутри которого вписаны выводы компонента, мм.

При повороте компонента относительно центра максимальный радиус разворота будет у крайних выводов, поэтому проведем анализ их смещений от КП (рисунок 4.5). При развороте компонента происходит смещение его выводов относительно осей симметрии. При этом линия ОА отклонится от первоначального положения на угол $\Delta\theta$ (рисунок 4.5).

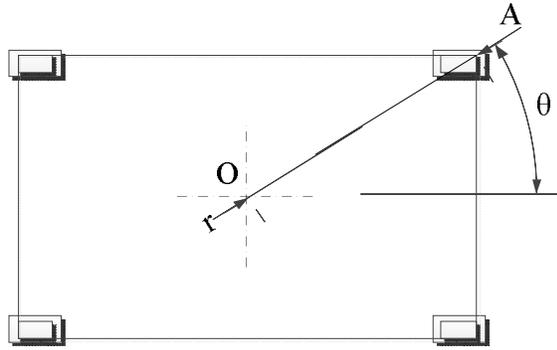


Рисунок 4.4 - Радиальная модель установки компонента

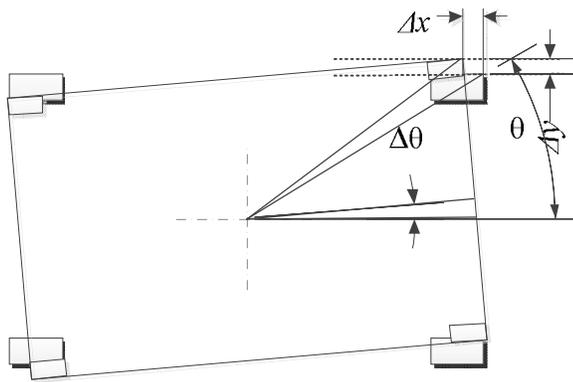


Рисунок 4.5 - Модель смещения выводов компонента при развороте

Произойдет сдвиг вывода относительно контактной площадки на величину $\Delta x, \Delta y$:

$$\Delta x = [\cos\theta - \cos(\theta + \Delta\theta)] \cdot r = -2r \cdot \sin\frac{-\Delta\theta}{2} \cdot \sin\frac{2\theta + \Delta\theta}{2} \approx 2r \cdot \sin\frac{\Delta\theta}{2} \cdot \sin\theta, \quad (4.12)$$

$$\Delta y = [\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta] \cdot r = 2r \cdot \sin\frac{\Delta\theta}{2} \cdot \cos\frac{2\theta + \Delta\theta}{2} \approx 2r \cdot \sin\frac{\Delta\theta}{2} \cdot \cos\theta, \quad (4.13)$$

Следовательно, относительная погрешность установки компонента δ_{Π} за счет углового смещения компонента будет:

$$\delta_{\Pi} = \max\{\delta_x, \delta_y\}, \quad (4.14)$$

где $\delta_y = \frac{\Delta y}{y} = 2 \cdot \sin\frac{\Delta\theta}{2} \cdot \operatorname{ctg}\theta = 2 \cdot \frac{l_x}{l_y} \cdot \sin\frac{\Delta\theta}{2}$; $\delta_x = \frac{\Delta x}{x} = 2 \cdot \frac{l_y}{l_x} \cdot \sin\frac{\Delta\theta}{2}$

С учетом погрешности радиального смещения компонентов в захватах и в результате вибрации платы формула (4.9) дополняется еще одним слагаемым под корнем:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_K^2 + \delta_R^2 + \delta_C^2 + \delta_M^2 + \delta_T^2 + \delta_{II}^2}, \quad (4.15)$$

Теперь, зная габариты проекции компонента и величину допуска на угол поворота компонентов, можно учесть радиальные смещения контактных площадок.

Формула расчета (4.15) позволяет при выборе оборудования и при заданных значениях допусков на конструкцию компонентов и ПП выполнить расчет прогнозной оценки погрешности сборки.

4.2. Разработка модели совмещения вывода с контактными площадками

Выбор правил расчета допусков на установку компонентов регламентируется методикой контроля допусков на точность сборки, которая представлена в стандартах [22]. Методика основана на классификации типов печатных узлов по МЭК 61192-1-2010 [25] и включает в себя три класса — А, В, С. Класс А: Электронные изделия общего назначения; Класс В: Специализированная техника; Класс С: электронная аппаратура ответственного назначения. Как правило, в каждом классе устанавливается три следующих уровня качества изготовления:

а) *Заданное состояние* - эталон режима работы и качества изготовления, который должен быть целью для всех операций производственного процесса: категория «годно».

б) *Допустимое состояние* - состояние с минимально допустимым качеством изготовления, которое без ремонта и доработки допустимо для поставки заказчику или, если это необходимо, на следующий участок изготовления. Если частота отклонений от требований данного стандарта возрастает для значительного объема производства (что установлено предварительно определенными пределами управления технологическим процессом), то данный факт рекомендуется считать основанием для беспокойства и необходимости корректирующих действий: категория «годно».

с) *Недопустимое состояние* - случай, который требует корректировки с применением надлежащей доработки (или выбрасывания в отходы) и должен

быть официально отмечен как дефект качества и управления технологическим процессом. Считается вероятным, что данный случай представляет технологический процесс неприемлемым, а изделие впоследствии - ненадежным: категория «не годно».

В стандарте устанавливаются нормы и критические погрешности установки компонентов в различном конструктивном оформлении корпусов. Ниже рассмотрим построение модели для определения зависимости качества установки компонента в посадочное место на примере корпуса микросхем с плоскими ленточными L-образными выводами или в виде крыла чайки по четырем сторонам корпуса (рисунок 4.6) [26].

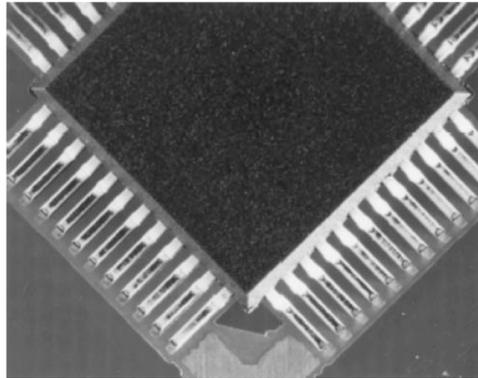


Рисунок 4.6 - Установка корпусов микросхем с выводами в виде крыла чайки, четыре стороны [26]

Для алгоритмической обработки и формирования правил проверки качества установки компонентов необходимо выполнить систематизацию нормативов, определенных в стандарте.

Компоненты допускается смещать по осям X, Y или поворачивать. Критерии состояний относятся к точности установки. Т.к. при сборке необходимо минимизировать брак, поэтому в дальнейшем будут рассматриваться только недопустимые состояния установки компонента [26].

Заданное состояние для печатных узлов классов А, В, С

- 1 Ножки всех выводов, включая области пяток и носков, отцентрированы на контактных площадках.
- 2 Корпус компонента не повернут (рисунок 4.7).

Недопустимое состояние для печатных узлов класса А

- 1 X-направление: боковой выступ A ножки вывода более $0,5W^a$ или 0,5 мм (что меньше).
- 2 Y-направление: свисание носка — более $0,5W$ или выступание любой пятки за контактную площадку (рисунок 4.8).

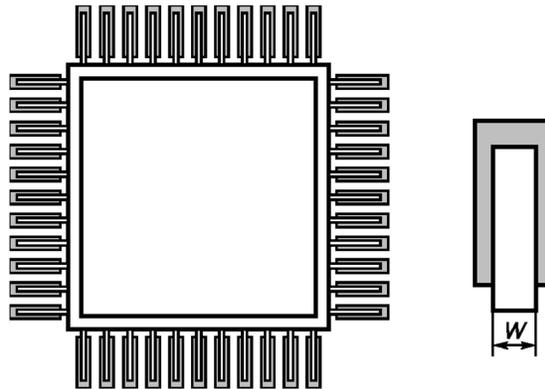


Рисунок 4.7 - Установка корпусов микросхем с выводами в виде крыла чайки, четыре стороны: заданное состояние [26]

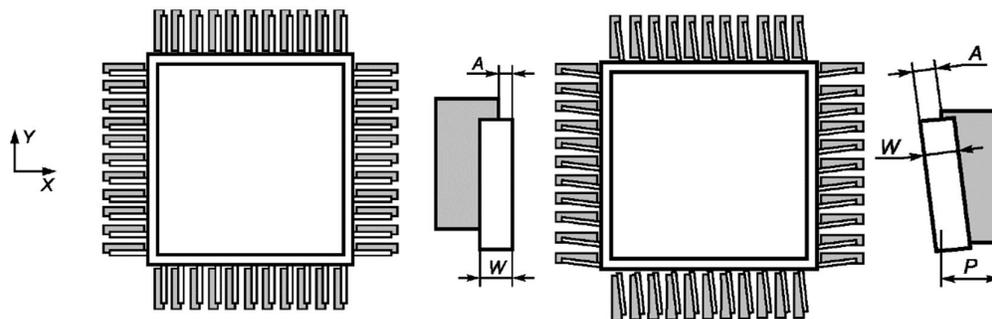


Рисунок 4.8 - Установка корпусов микросхем с выводами в виде крыла чайки, на четыре стороны: недопустимые состояния [26]

Недопустимое состояние для печатных узлов класса В

- 1 X-направление: боковой выступ A ножки вывода более $0,5W^a$ или 0,5 мм (что меньше).
- 2 Y-направление: носок или пятка любого вывода выступает за контактную площадку.

Недопустимое состояние для печатных узлов класса С

- 1 X-направление: боковой выступ A ножки любого вывода — более $0,25W$ или 0,5 мм (что меньше).

2 У-направление: носок или пятка любого вывода выступает за контактную площадку.

Примечание - Если ширина P контактной площадки меньше ширины W вывода компонента — край контактной площадки в У-направлении не должен выходить за край вывода больше, чем на $0,25P$ или $0,1$ мм, (что больше).

^a для корпусов с шагом выводов не более $0,5$ мм — $A \leq 1/3W$.

На рисунках 4.9 и 4.10 показаны боковое смещение и выступ носка вывода.

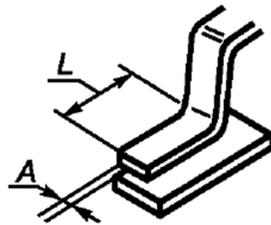


Рисунок 4.9 – Боковое смещение

[22]

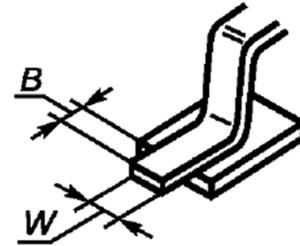


Рисунок 4.10 – Выступ носка

вывода [22]

Как видно из представленных правил, для отбраковки узлов на ПП используются параметры: ширина P контактной площадки, ширина вывода компонента W , смещение краев вывода относительно краев КП. Кроме перечисленных параметров на правила оказывают влияние типы корпуса и выводов компонента, а также класс печатных узлов по ГОСТ МЭК 61191-2-2010 [22] и плотность монтажа по ГОСТ Р МЭК 61188-5-1-2012 [20].

Для решения задачи оптимизации размеров КП построим модель совмещения вывода с КП (рисунок 4.11), в которой кроме размеров контуров вывода и КП заданы размеры минимальной зоны попадания вывода компонента Z ($X_3 \times Y_3$). За пределами зоны Z размещение вывода компонента приведет к браку.

Для построения модели для каждого вывода введем собственную систему координат с началом в центре в КП (рисунок 4.11). Ось OX ориентирована параллельно ближайшей стороне корпуса компонента. Ось OY ориентирована перпендикулярно ближайшей стороне корпуса компонента.

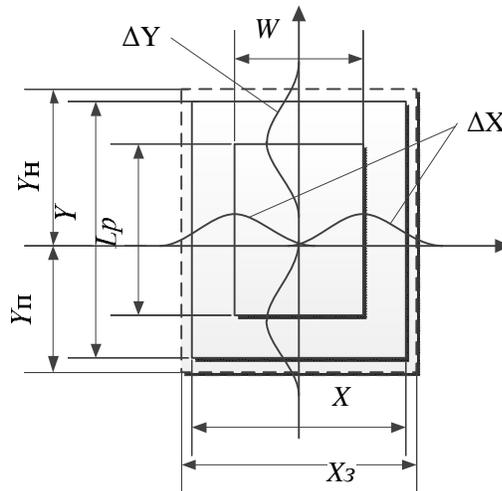


Рисунок 4.11 - Модель совмещения вывода с КП

Пусть Δx величина сдвига компонента при сборке вдоль оси OX , а Δy - вдоль оси OY . Тогда согласно методики ГОСТ для определения дефекта необходимо, чтобы выполнялись неравенства:

- 1) Для бокового смещения:

$$\frac{X_3 - W}{2} - |\Delta x| \leq 0, \quad (4.16)$$

- 2) Для смещения носка вывода:

$$\left(Y_n - \frac{L_p}{2} \right) - \Delta y \leq 0, \quad (4.17)$$

- 3) Для смещения пятки вывода:

$$\left(Y_{п} - \frac{L_p}{2} \right) - \Delta y \leq 0, \quad (4.18)$$

где W - ширина вывода, мм;

X_3 - ширина зоны попадания вывода компонента Z , мм;

Y_3 - длина зоны попадания вывода компонента Z , мм; $Y_3 = Y_n + Y_{п}$;

Y_n - сдвиг носка по зоне попадания вывода компонента Z , мм;

$Y_{п}$ - сдвиг пятки по зоне попадания вывода компонента Z , мм;

L_p - длина вывода компонента, мм;

Разделим левую часть неравенства на ширину вывода W :

$$K_{\delta} - \frac{1}{2} - |\delta_x| \leq 0, \quad (4.19)$$

$$K_n - K_y - |\delta_y| \leq 0, \quad (4.20)$$

$$K_{\Pi} - K_y - |\delta_y| \leq 0, \quad (4.21)$$

где $K_{\delta} = \frac{X_3}{2W}$; $K_n = \frac{Y_n}{W}$; $K_{\Pi} = \frac{Y_{\Pi}}{W}$; $K_y = \frac{L_p}{2W}$; δ_x - относительное смещение вбок; δ_y - относительное смещение вдоль КП.

Запишем правила определения недопустимых состояний для корпусов микросхем с выводами в виде крыла чайки на четыре стороны с использованием записанных неравенств.

Поле допуска относительной погрешности бокового смещения вывода:

$$Del_x = \frac{X_3 - W}{2W}, \quad (4.22)$$

Поле допуска относительной погрешности продольного смещения вывода для данного корпуса определяется отдельно по смещению носка и пятки вывода.

Для носка вывода:

$$Del_y^+ = \frac{Y_n - L_p/2}{W}, \quad (4.23)$$

для пятки вывода:

$$Del_y^- = \frac{Y_{\Pi} - L_p/2}{W}, \quad (4.24)$$

Расчет размеров запрещенной зоны.

Недопустимое состояние для печатных узлов класса А.

При боковом смещении рассматриваются 3 случая:

$$A) X_3 = 2W/3 + X, Del_x = \frac{2W/3 + X - W}{2W} = \frac{3X - W}{6W}, \text{ если } P \leq 0,5, \quad (4.25)$$

$$B) X_3 = W + X, Del_x = \frac{W + X - W}{2W} = \frac{X}{2W}, \text{ если } 0,5W \leq 0,5, \quad (4.26)$$

$$B) X_3 = X + 1, Del_x = \frac{X + 1 - W}{2W}, \text{ если } 0,5W > 0,5, \quad (4.27)$$

При продольном смещении рассматриваются случаи выхода носка из зоны и пятки:

$$Y_n = 0,5(W + Y), \quad Del_y^+ = \frac{0,5(W + Y) - L_p/2}{W}, \quad (4.28)$$

$$Y_{II} = 0,5 \cdot Y, \quad Del_y^- = \frac{0,5 \cdot Y - L_p/2}{W} \quad (4.29)$$

Т.к. компонент ориентируется в процессе конструирования узла, то для определения допуска на смещение Del необходимо взять минимальное значение

$$Del = \min(Del_x, Del_y^+, Del_y^-) \quad (4.30)$$

Недопустимое состояние для печатных узлов класса В

При боковом смещении рассматриваются 3 случая, которые определяются по формулам (4.25, 4.26, 4.27).

При продольном смещении рассматриваются случаи выхода носка из зоны и пятки:

$$Y_n = 0,5 \cdot Y, \quad Del_y^+ = Del_y = \frac{0,5 \cdot Y - L_p/2}{W}, \quad (4.31)$$

$$Y_{II} = 0,5 \cdot Y, \quad Del_y^- = Del_y = \frac{0,5 \cdot Y - L_p/2}{W} \quad (4.32)$$

$$Del = \min(Del_x, Del_y) \quad (4.33)$$

Недопустимое состояние для печатных узлов класса С

При боковом смещении рассматриваются 2 случая:

$$A) \quad X_3 = W/2 + X, \quad Del_x = \frac{W/2 + X - W}{2W} = \frac{2X - W}{4W}, \quad \text{если } 0,25W \leq 0,5, \quad (4.34)$$

$$B) \quad X_3 = X + 1, \quad Del_x = \frac{X + 1 - W}{2W}, \quad \text{если } 0,5W > 0,5, \quad (4.35)$$

При продольном смещении рассматриваются случаи выхода носка из зоны и пятки Del_y^+, Del_y^- , которые определяются по формулам (4.31, 4.32 и 4.33).

Таким образом, получены аналитические выражения для расчета допусков.

Построенная модель совмещения вывода с КП позволяет рассчитать значения допусков на смещение компонента при сборке в зависимости от

требований точности, предъявляемых к узлам на ПП, геометрических размеров проекций выводов и размеров КП. Причем в модели учитывается, что смещения выводов в различных направлениях имеют различную логику обработки недопустимых состояний. Представленные выше правила имеют структуру высказываний вида: *«если условие выполнено, то состояние недопустимое»*. Такие правила могут эффективно обрабатываться с помощью систем логического вывода. Таким образом, построенная модель может использоваться для создания базы знаний экспертной системы.

Проведенная систематизация правил расчета допусков и погрешностей сборки позволяет перейти к разработке алгоритмов и программ прогнозирования показателей надежности сборочно-монтажных операций в зависимости от характеристик конструкции и технологии сборки ПП.

4.3. Разработка программно-алгоритмических средств для прогнозирования вероятности нарушения допусков на установку компонентов на ПП

Погрешности смещения выводов компонентов от контуров КП является одной из основных контролируемых причин появления брака при сборке устройств на ПП. Добиваясь высоких показателей производительности, разработчики и изготовители устройств РЭА при этом испытывают значительные трудности в обеспечении качества установки компонентов. Причины снижения качества проанализированы в п.1.3. Сборка считается надежной, если не нарушены допуски на установку компонентов в посадочные места на ПП. В п. 4.2 рассмотрены правила установки компонентов на поверхности ПП, нарушения которых приводит к снижению надежности монтажа.

В п.4.1 рассмотрены методики определения параметров посадочных мест компонентов на ПП, а в п.4.2 рассмотрены методики определения погрешностей смещения выводов компонентов относительно КП. Используя их, перейдем к разработке алгоритмов прогнозирования и оценки показателей надежности сборки при решении перечисленных выше задач. Исходными данными для

выполнения этих алгоритмов будут сведения о нормах выбора параметров посадочных мест изложенных в ГОСТ ИЕС 61188-5-2-2013 [16], правила определения допусков на смещение проекций выводов компонентов относительно КП из ГОСТ МЭК 61191-2-2010 [22] и метод расчета погрешностей установки компонента (формула 4.15).

Структурная схема алгоритма прогнозирования показателя надежности монтажа компонента при сборке на поверхности ПП приведена на рисунке 12.

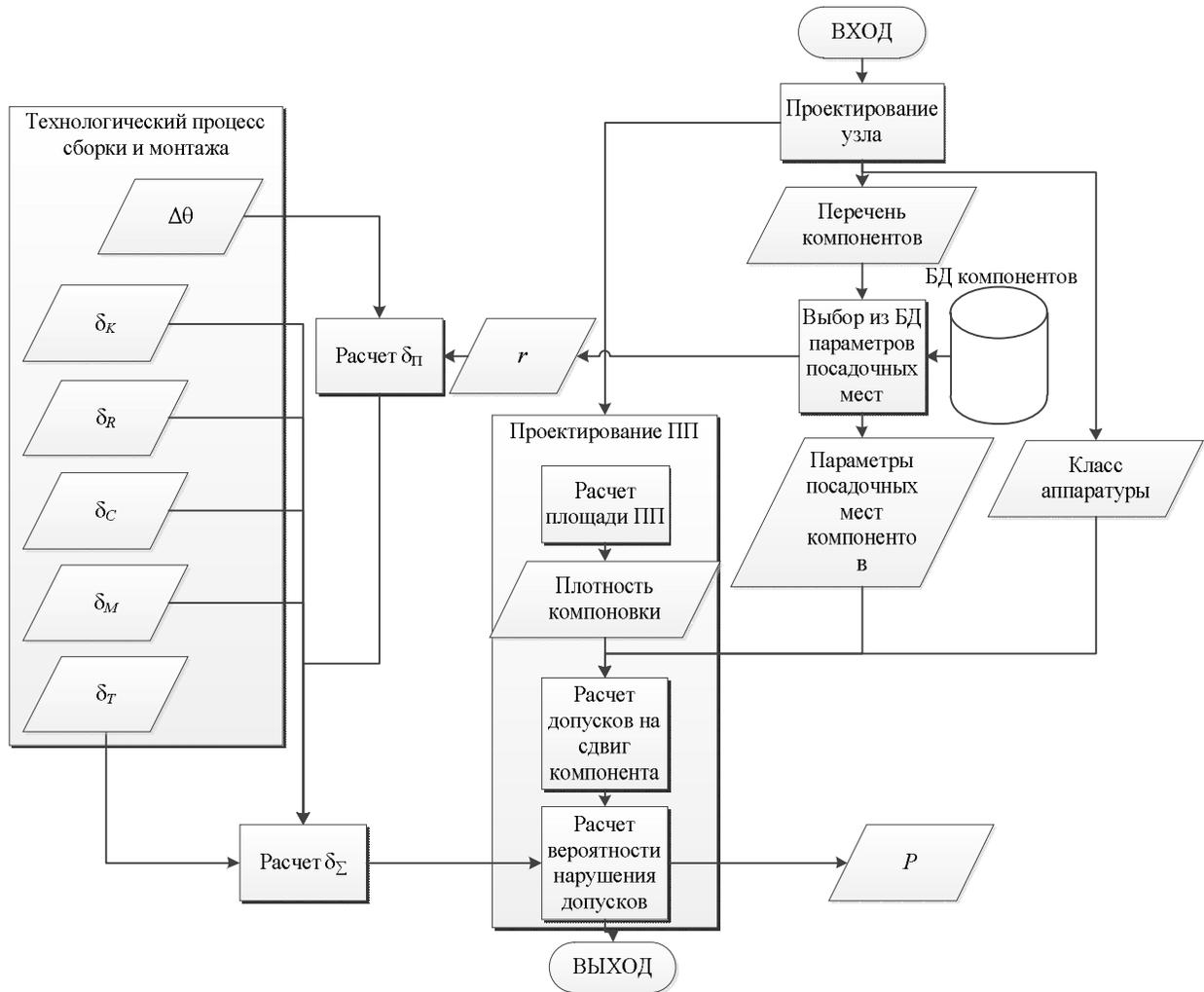


Рисунок 4.12 - Алгоритм прогнозирования показателей надежности ППП при сборке

В качестве показателя надежности используется вероятность не нарушения допуска на смещение выводов относительно КП. Проектирование ППП выполняется при известных допусках на погрешности расположения вывода по отношению к центру корпуса компонента δ_K , расположения контактной площадки

по отношению к элементу базирования на печатной плате δ_R , расположения центра захватного устройства автомата и центра корпуса компонента δ_C , расстояния между элементом базирования на печатной плате и центром системы координат механизма перемещения автомата δ_M , перемещения компонента от места захвата до места установки на ПП δ_T , углового смещения компонента $\Delta\theta$ после установки на ПП. Эти погрешности определяются выбранными технологическими процессами изготовления ПП и сборки узла.

При проектировании узла РЭА выбирается компонент, для которого необходимо рассчитать вероятность нарушения допуска установки в посадочное место ПП.

Из базы данных выбираются габариты посадочного места компонента и по ним вычисляется радиальный габарит r . По значению угла поворота компонента $\Delta\theta$, который является характеристикой сборочного оборудования, и по параметру r рассчитывается относительная погрешность смещения δ_{Π} . Используя δ_{Π} и остальные параметры погрешностей (δ_K ; δ_R ; δ_C ; δ_M ; δ_T), рассчитывается суммарная погрешность смещения выводов δ_{Σ} (4.15).

В процессе проектирования ПП из базы данных выбираются параметры посадочного места компонента (размеры КП). В зависимости от выбранного уровня плотности монтажа определяются размеры КП посадочного места (рисунок 4.13).

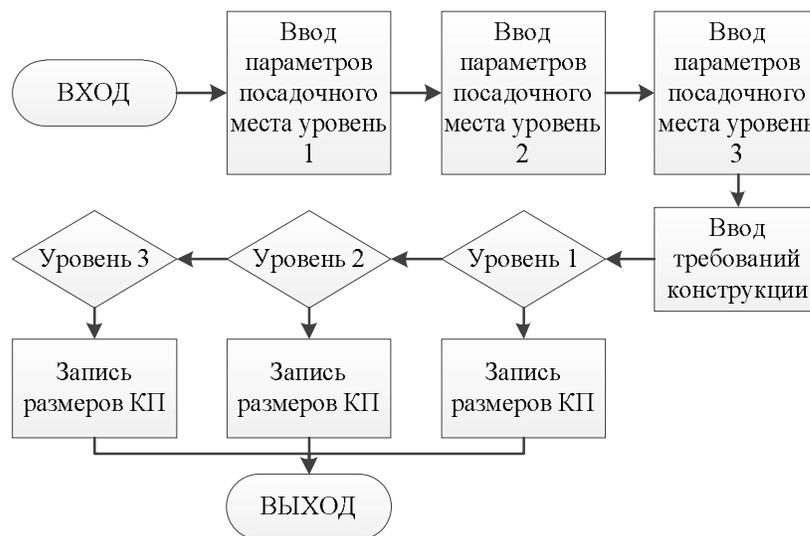


Рисунок 4.13 - Алгоритм выбора размеров КП

Для расчета показателя надежности сборки необходим допуск на смещение вывода при сборке, которые определяются по методике, изложенной в п.4.2. Алгоритм расчета допусков на установку компонента на поверхности ПП представлен на рисунке 4.14.

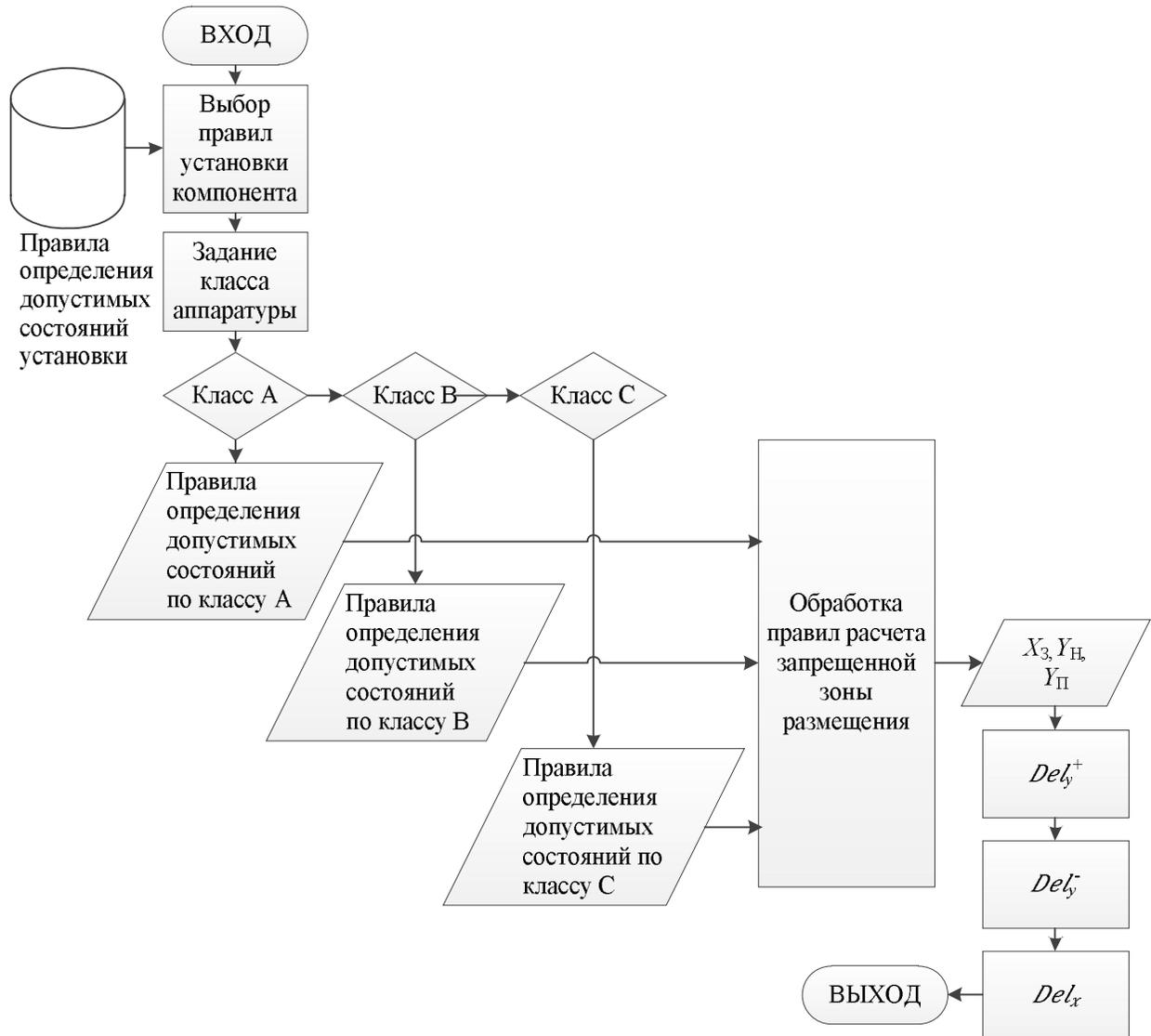


Рисунок 4.14 - Алгоритм расчета допусков на установку компонента на поверхности ПП

В ГОСТ Р МЭК 61191-2-2010 [22] методики расчета допусков определены для каждого типа корпусов, поэтому невозможно разработать универсальный алгоритм расчета. Для решения подобных задач применяются системы обработки знаний [37], в которых разделены правила расчета и средства обработки этих

правил. В диссертации в качестве системы обработки знаний использована экспертная система, представленная в работе [30] [36].

Для вычисления допусков формируется база знаний в виде системы продукционных правил, определяющих логику и содержание расчетов. В таблице 4.8 приведен пример системы правил вычисления параметров модели совмещения вывода с КП и допуска совмещения вывода с КП для корпусов микросхем с выводами в виде крыла чайки.

Таблица 4.8 - Правила вычисления параметров модели совмещения вывода с КП и допуска совмещения вывода с КП для корпусов PLQFP

№	Условие	Вычисление	Результат
1	$Class==A \ \& \ (P \leq 0,5)$	$2*W/3+X$	Xz
2	$Class==A \ \& \ (0,5*W \leq 0,5)$	$W+X$	Xz
3	$Class=A \ \& \ (0,5*W > 0,5)$	$X+1$	Xz
4	$Class==B \ \& \ (P \leq 0,5)$	$2*W/3+X$	Xz
5	$Class==B \ \& \ (0,5*W \leq 0,5)$	$W+X$	Xz
6	$Class=B \ \& \ (0,5*W > 0,5)$	$X+1$	Xz
7	$Class==C \ \& \ (0,25*W \leq 0,5)$	$W/2+X$	Xz
8	$Class==C \ \& \ (0,5*W > 0,5)$	$X+1$	Xz
9	$Var(Xz)==TRUE$	$(X_3-W)/2W$	Del_x

В оболочке экспертной системы результатом вычисления правила является значение параметра x и признак завершения расчета параметра $Var(x)$. Выбор очередного правила осуществляется путем анализа признаков завершения вычисления всех исходных данных и выполнения условия расчета. В результате в оболочке автоматически строятся цепочки исчисления параметров по заданным в базе знаний формулам расчета.

После завершения расчета допусков и погрешностей смещения выполняется расчет вероятности нарушения требований сборки.

Модель компонента связывает вероятность собираемости компонента с погрешностями установки компонента на плату. Для ее исчисления определяется

относительная погрешность δ_Σ отклонения контура вывода от положения в центре контактной площадки по формуле (4.15). На закон распределения погрешности δ_Σ оказывают влияние множество независимых технологических факторов, имеющих собственные законы распределения. Согласно предельной теореме теории вероятности: сложение распределений случайных независимых величин дает нормальный закон распределения суммарной величины. Поэтому можно считать, что погрешность смещения компонента подчиняется нормальному закону распределения полем рассеивания на уровне $\pm 3\sigma$, равному $\pm \delta_\Sigma$ (рисунок 4.15).

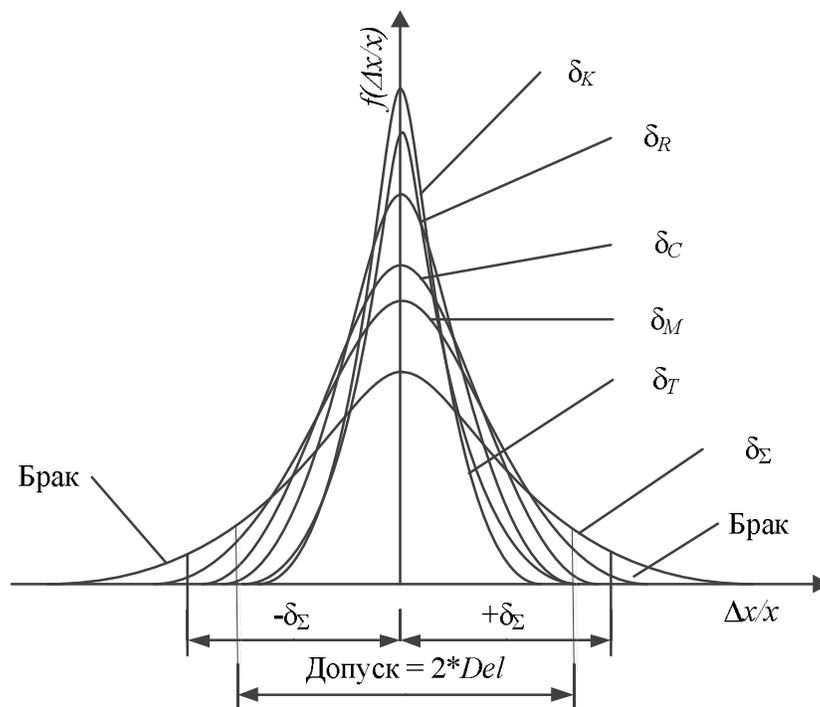


Рисунок 4.15 - Сложение законов распределения погрешностей смещения компонентов при сборке

Вероятность отклонения положения центра вывода от центра контактной площадки p определит показатель собираемости компонентов на плате. Для этого используется функция Лапласа:

$$\Phi\left(\frac{x-a}{\sigma}\right) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (4.36)$$

где $a=0$ математическое ожидание погрешности, $x=Del$ – предельная погрешность отклонения центра вывода, где σ – среднее квадратичное отклонение (СКО) относительной погрешности. Вероятность запредельного отклонения центра вывода рассчитывается по формуле:

$$q=1-2\cdot\Phi\left(\frac{Del}{\sigma}\right) \quad (4.37)$$

После расчета по правилам ГОСТ МЭК 61192-1-2010 [25] и разработанной методики допуска Del на допустимые смещения компонентов при сборке можно для каждого компонента по формуле (4.37) рассчитать вероятность появления брака на выходе ТП.

Зная показатель нарушения допуска одного компонента q_i , можно рассчитать показатель вероятности появления ненадежных установок компонентов для всей схемы:

$$\bar{Q}=1-\prod_{i=1}^m(1-q_i) \quad (4.38)$$

где m – количество компонентов схемы узла.

Перечисленные выше задачи оптимизации требуют для оперативного вычисления условий и критериев. Разработанное программное обеспечение выполняет функцию расчета вероятности нарушения допусков на установку компонентов под воздействием конструктивных и технологических факторов, влияющих на надежность паяных соединений при сборке. Программное обеспечение ориентировано на встраивание в задачи оптимизации. Структурная схема, поясняющая работу программного комплекса, показана на рисунке 4.16.

Программный комплекс включает:

- базу данных компонентов;
- базу знаний правил расчета допусков установки компонентов;
- программные модули.

База данных компонентов содержит характеристики и параметры корпусов и посадочных мест компонентов. База знаний содержит правила расчета допусков на установку компонентов поверхностного монтажа, сформированных по

методикам из ГОСТ Р МЭК 61191-1-2010 [21]. Программные модули разработаны на языках С# и VB NET и выполняют функции: исчисления и выбора параметров из базы данных, ввода и вывода информации, управления вычислениями по продукционным правилам базы знаний.



Рисунок 4.16 - Структура программного комплекса прогнозирования дефектов сборки

На вход программного модуля выборки параметров компонентов подается название компонента и уровень плотности монтажа на ПП. Модуль формирует запрос к базе данных и по запросу выдает значения параметров: размеры КП, размеры выводов компонента, габариты компонента.

Модуль расчета погрешностей установки компонента получает на входе параметры габаритов компонента и погрешности ТП установки. Используя методики расчета, представленные в п.4.1, модуль исчисляет по формуле 4.15 значения относительной погрешности смещения вывода компонента. Результат передается в модуль расчета вероятности смещения вывода за допуск.

Работа модуля расчета допусков установки представлена выше (рисунок 4.14). Результат с выхода модуля передается на вход модуля расчета вероятности смещения вывода за допуск.

Модуль расчета вероятности смещения за допуск работает по методике представленной выше и по формулам 4.37, 4.38 исчисляет значение вероятности, которое передается на выход программного комплекса для дальнейшего применения в задачах оптимизации.

Разработанные в данном параграфе алгоритмы и программы позволяют автоматизировать расчеты значений показателя надежности установки компонентов в посадочные места ПП при заданных условиях исполнения ТП. Для выполнения поставленной задачи была проведена систематизация существующих методик, что позволило формализовать процедуры прогнозирования вероятности смещения выводов при сборке за допустимые. Это дает возможность разрабатывать на основе представленных алгоритмов и программ алгоритмы решения задач оптимизации по критериям надежности сборки при:

- проектировании узлов РЭА на ПП;
- выборе изготовителя ПП и монтажа компонентов;
- создании собственного сборочно-монтажного производства.

4.4. Задача оптимизации размеров монтажных контактных площадок компонентов при конструировании ПП

Уменьшение размеров выводов и увеличение плотности монтажа приводит к рискам появления брака в сборочно-монтажных операциях. У разработчика устройств на ПП появляется альтернатива выбора между миниатюризацией изделия и обеспечением показателей качества ТП. Как показано выше одним из способов изменения показателей качества является варьирование ресурса магистрали между контактными площадками. Результат достигается выбором размеров КП. Небольшие уменьшения размеров КП приводят к появлению

дополнительных свободных промежутков, через которые прокладываются дополнительные трассы.

В работе [70] показано, как изменение шага выводов влияет на возможности трассировки соединений. Особенно сильно на плотность трассировки влияют параметры КП многовыводных компонентов. Для определения возможностей трассировки между КП необходимо вычесть из шага выводов размер КП (формула 4.3 в п. 4.1). В результате получится размер свободного пространства для разводки проводников.

В рассмотренном примере (в п.4.2) выбора размеров КП для корпуса PLQFP (таблица 4.2) при шаге выводов 0,5 мм ширина КП X вывода может принимать значения 0,33 мм; 0,33 мм; 0,25 мм для уровней плотности 1, 2, 3. Свободное пространство будет принимать значения соответственно: 0,17 мм; 0,17 мм; 0,25 мм.

Если проектируется ПП 6-го класса точности, то при выборе 3-го уровня плотности между КП можно провести 1 дополнительный проводник, т.к. для разводки требуется пространство $0,075 \cdot 3 = 0,225$ мм, что меньше расстояния между краями соседних КП 0,25 мм. Для ПП более низких классов точности уплотнение не повышает количества свободных магистралей.

В приложении Г выполнен анализ изменения вероятности нарушения допусков на установку компонентов для платы устройства обработки цифровых сигналов на основе микросхемы FPGA XC3S500E-4PQG208C. При переходе от 1-го и 2-го уровня плотности к 3-му для 5-го и 6-го класса точности ПП появляется дополнительный ресурс разводки проводников. Учитывая количество выводов микросхем в применяемых корпусах, количество дополнительных магистралей трассировки возрастает для каждого корпуса типов: P-SSOP20 (14 корпус) на 18 шт. и P-SSOP16 (7 корпус) на 14 шт., для каждого корпуса типа P-QFP 0208 на 204 шт. (1 корпус). Таким образом общее увеличение числа магистралей по всем корпусам составит $18 \cdot 14 + 14 \cdot 7 + 204 \cdot 1 = 554$ магистралей. Количество сигнальных цепей проектируемого устройства 208 шт. Это показывает, что дополнительные магистрали трассировки оказывают значительное влияние на условия трассировки

ПП и, как следствие, на площадь ПП и на количество сигнальных слоев металлизации при фиксированной площади ПП. Особенно сильное влияние на качественные показатели ПП может оказать уменьшение количества слоев.

Анализ примера показывает, что вероятности отклонения положения вывода от допустимых значений при переходе 3-му уровню плотности значительно возрастают (таблица 4.8)

Таблица 4.8 – Вероятности отклонения положения вывода от допустимых значений при установке компонентов для платы устройства обработки цифровых сигналов на основе микросхемы FPGA XC3S500E-4PQG208C

	Вероятность нарушения допусков		
	Класс А	Класс В	Класс С
Уровень 1	0,062%	0,062%	8,8%
Уровень 2	0,062%	0,062%	8,8%
Уровень 3	2%	2%	49,7%

Отсюда можно сделать вывод, что при выбранной технологии сборки надежность паяных соединений резко снижается. Следовательно, необходимо либо применять более точное сборочное производство, либо пожертвовать конструктивно-технологическими показателями для повышения надежности и перейти к низким уровням плотности. Для аппаратуры класса С оцениваемая в примере технология сборки скорее всего вообще неприемлема.

Из примера видно, что оптимизация выбора размеров КП может принести ощутимые результаты при разработке конструкции ПП. Рассмотрим алгоритм решения этой задачи.

Постановка задачи оптимизации выбора размеров контактных площадок

1. Как следует из представленного выше материала можно выделить две альтернативные возможности улучшения качества конструкции узла на ПП при сборке: увеличение ресурса магистралей за счет уменьшения размеров КП и повышение надежности монтажа за счет расширения площади КП. Как в любой задаче оптимизации следует искать разумное сочетание альтернативных

возможностей. При этом один из факторов улучшения качества становится критерием оптимизации, второй переводится в разряд ограничений.

Надежность и работоспособность обычно оговаривается в технических условиях на производство изделий. Смещение выводов относительно КП посадочного места напрямую влияет на надежность монтажа компонента. Поэтому, в дальнейшем будем рассматривать требования к допустимым смещениям компонентов в качестве ограничений задачи.

Как было показано в п.4.2 вероятность запредельного отклонения центра вывода зависит от допуска на смещение компонента и рассчитывается по формуле (4.37). Погрешность на смещения компонента из-за конструктивно-технологических погрешностей характеризуется среднеквадратичным отклонением σ , а допуск на предельное отклонение положения вывода компонента от центра КП Del рассчитывается исходя из недопустимых состояний для печатных узлов заданного класса (см. п.4.2) при выбранном уровне плотности монтажа по стандарту IEC 61188.

Вычислив по формуле (4.37) вероятность q_i отклонения центра выводов за границы допуска для каждого компонента схемы, можно рассчитать вероятность нарушения качества сборки по всему узлу по формуле (4.38).

Предполагая, что $q_i \ll 1$, можно записать

$$\bar{Q} \approx \sum_{i=1}^m q_i, \quad (4.39)$$

где m – количество компонентов схемы узла.

Задавая предельную вероятность $Q_{\text{доп}}$ превышения допуска на смещение компонента, можно записать ограничение задачи оптимизации

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^3 q_{ij} k_{ij} \leq Q_{\text{доп}}, \quad (4.40)$$

где, q_{ij} – вероятность нарушения допуска при выборе j -го уровня плотности монтажа по стандарту IEC 61188; k_{ij} - бинарная функция назначения уровня плотности монтажа для i -го компонента,

$$k_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если выбран } j\text{-го уровня плотности монтажа} \\ 0, & \text{если } j\text{-й уровень плотности монтажа не выбран} \end{cases}$$

2. Для расчета ресурса магистралей, освобождаемого за счет пространства между соседними КП посадочного места компонента, воспользуемся данными из таблиц стандарта IEC 61188, в которых приведены рекомендуемые размеры КП и расстояния между соседними выводами компонента.

Освобождаемый ресурс магистралей между КП для монтажа выводов компонентов устройства

$$\Psi = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^3 \frac{(E_i - x_{ij})k_{ij}}{t}, \quad (4.41)$$

где E_i - шаг выводов i -го компонента; x_{ij} - ширина КП посадочного места i -го компонента при выборе j -го уровня плотности монтажа по стандарту IEC 61188; t - минимальный шаг трассировки соединений, равный сумме минимальной ширины проводника и минимального зазора между элементами топологии ПП.

Задача оптимизации: найти оптимальное назначение уровней плотности монтажа $K^* = (k_1^*, k_2^*, \dots, k_m^*)$ для компонентов устройства, максимизирующее значение суммарного, освобождаемого ресурса магистралей между КП посадочных мест компонентов

$$\Psi^* = \Psi(K^*) = \max \Psi(K) = \max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^3 \frac{(E_i - x_{ij})k_{ij}}{t}, \quad (4.42)$$

Функция оптимизации (4.42) и функция ограничений (4.40) являются сепарабельными, поэтому к данной задаче оптимизации может быть применен классический метод динамического программирования.

Метод решение задачи оптимизации

Задачи оптимизации методом динамического программирования (МДП) хорошо проработана [46].

Решение находится путем пошагового расчета функции оптимизации $\Psi_k(Q)$

$$\Psi_k(Q) = \max_{i=1}^m \sum_{i=1}^m \rho_i(q_i) \quad (1 < k < N), \quad (4.43)$$

где $\sum_{i=1}^k q_i \leq Q$, $(0 \leq Q \leq Q_{\text{доп}})$,

$\rho_i(q_i)$ – функция расчета ресурса магистралей i -го компонента при значении ограничения q_i .

На шаге $k \geq 1$ функция $\Psi_k(Q)$ вычисляется с помощью рекуррентного соотношения:

$$\Psi_k(Q) = \max_k [\Psi_{k-1}(Q_{k-1}) + \rho_k(q_k)], \quad (4.44)$$

где $Q_{k-1} + q_k \leq Q \leq Q_{\text{доп}}$.

Оптимальное значение целевой функции для совокупности устанавливаемых компонентов будет найдено на n -м шаге при ограничении Q_n^*

$$\Psi_n^*(Q_n^*) = \max_{Q \leq Q_{\text{доп}}} \Psi(Q), \quad (4.45)$$

Оптимальное решение находится обратным просмотром найденных частных решений для последовательности ТО

$$\Psi_{n-1}^*(Q_{n-1}^*) = \Psi_n^*(Q_n^*) - \rho_n^*(Q_n^*)$$

.....

$$\Psi_1^*(Q_1^*) = \Psi_2^*(Q_2^*) - \rho_2^*(Q_2^*)$$

где $Q_{n-1}^*, Q_{n-2}^*, \dots, Q_1^*$ значения ограничений для вероятности выхода смещения за допуск при оптимальных значениях уровня плотности монтажа на $(n-1)$, $(n-2)$, ..., 1-м шагах алгоритма.

Кластерная модель оптимизации МДП

Для получения математической модели алгоритма оптимизации введем понятие кластера частного решения (КЧР). КЧР можно представить в виде направленного графа $\theta=(X, \Gamma)$ (рисунок 4.17), в котором задано 4 вершины: $X_{ik}=\{x_1, x_2, x_3\}$ и χ .

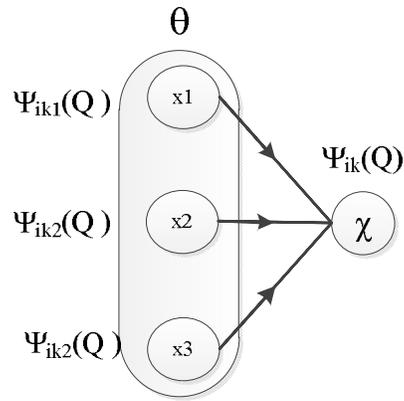


Рисунок 4.17 - Модель кластера

КЧР является моделью рекуррентного соотношения (4.44), заданного на k -м шаге алгоритма оптимизации при ограничении $\sum_{i=1}^k q_i \leq Q$, ($0 \leq Q \leq Q_{\text{доп}}$). Вершины x_1, x_2, x_3 обозначают решения $\Psi_{ik1}(Q), \Psi_{ik2}(Q), \Psi_{ik3}(Q)$, полученные на k -м шаге алгоритма оптимизации при выборе для k -го компонента соответственно 1-го, 2-го и 3-го уровня плотности монтажа. Параметр КРЧ $\Psi_{ik}(Q) = \max(\Psi_{ik1}(Q), \Psi_{ik2}(Q), \Psi_{ik3}(Q))$ обозначает решение, выбранное на k -м шаге алгоритма оптимизации. Таким образом, КЧР может быть представлен элементом с четырьмя выводами, решающим частную задачу выбора оптимального решения $\Psi_{ik}(Q)$.

При использовании объектного программирования удобно представить работу модели КЧР с помощью класса, выполняющего две функции оптимизации. При прямом проходе алгоритма оптимизации на входы x_1, x_2, x_3 подаются параметры с выходов всех КЧР предыдущего уровня (Ψ_{ik-1}). При обратном проходе определяется вершина $x_{ik}^* \in X_{ik}$, которая принадлежит решению задачи.

На каждом шаге алгоритма выполняется анализ и выбор КЧР для очередного компонента. Для каждого k -го компонента в модели будет задано множество КЧР Θ_k , полученных на дискретном множестве $Q_k = \{Q_{1k}, Q_{2k}, \dots, Q_{mk}\}$ ограничений $Q_{ik} \in Q_k \ \& \ (Q_{ik} \leq Q_{\text{доп}})$. Обозначим КЧР символами $\theta_{ik} \in \Theta_k$, где k -номер компонента, i - номер КЧР в линейке КЧР k -го шага. Тогда математическая модель задачи оптимизации может быть представлена в виде графа (рисунок

4.18), заданного на множестве вершин $\Theta: \{\theta_{ik} \in \Theta_k \in \Theta, i=1 \div m, k=0 \div n+1\}$, где k - количество собираемых компонентов узла РЭА, m - количество уровней дискретизации значения ограничения задачи по вероятности недопустимых смещений компонентов при сборке.

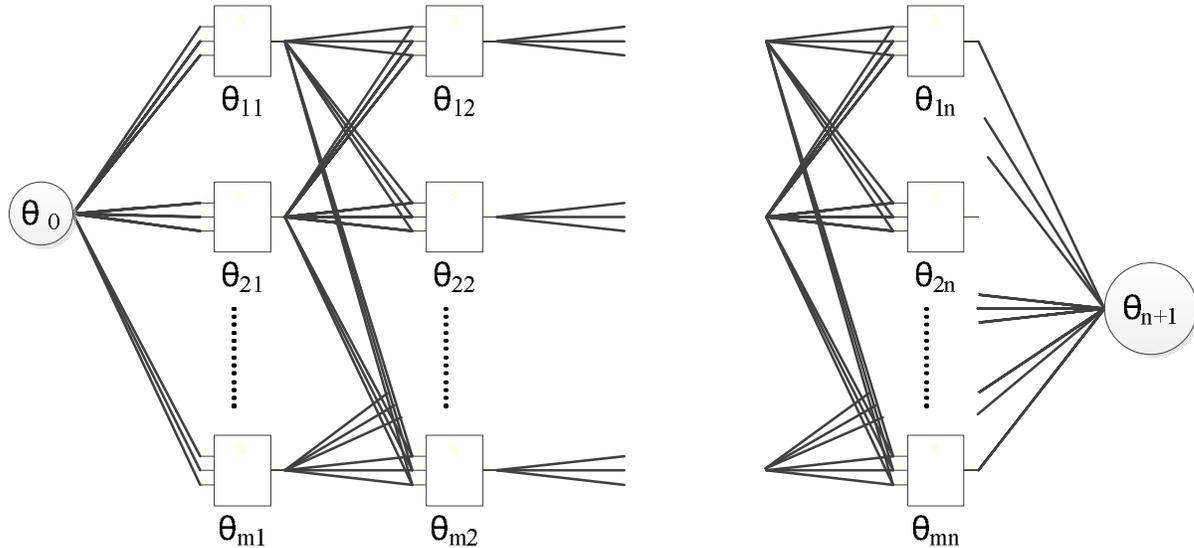


Рисунок 4.18 - Представление задачи оптимизации с помощью графа КЧР

Алгоритм оптимизации задачи выбора размеров КП

Работу алгоритма оптимизации поясняют рисунки 4.19 и 4.20. На рисунке 4.19 показаны процедуры при выполнении прямого хода алгоритма, на котором каждая вершина КЧР получает значение параметра Ψ_{ik} . В блоке 1 выбирается вершина θ_0 и выполняется присвоение значения параметру $\Psi_0=0$. В блоке 2 выполняется переход к следующей линейке вершин модели (компонент k). В блоке 3 последовательно выбираются вершины из линейки k . В блоке 4 для выбранного КЧР θ_{ik} выполняется расчет параметров $\Psi_{ik1}(Q_{ik})$, $\Psi_{ik2}(Q_{ik})$, $\Psi_{ik3}(Q_{ik})$ по формуле (4.44). В блоке 5 для каждого выбранного КЧР θ_{ik} выполняется расчет параметра $\Psi_{ik}(Q_{ik})=\max(\Psi_{ik1}(Q_{ik}), \Psi_{ik2}(Q_{ik}), \Psi_{ik3}(Q_{ik}))$ и переход к следующему компоненту (следующей линейке). В блоке 6 выполняется проверка завершения цикла перебора КЧР линейки k и проверяется условие перехода к следующей КЧР. В блоке 7 выполняется проверка завершения цикла перебора компонентов и проверяется условие перехода к следующей линейке. В блоке 8

выполняется выбор значения Ψ_{n+1} , исходя из условия $\Psi_{n+1} = \max\{\Psi_{1n}, \Psi_{2n}, \dots, \Psi_{mn}\}$.

После завершения выполнения алгоритма всем вершинам будут присвоены значения функции Ψ_{ikj} (вершины множества $X_{ik}=\{x_1, x_2, x_3\}$ КЧР) и Ψ_{ik} (вершины χ КЧР).

Вторая часть алгоритма оптимизации изображена на рисунке 4.20. В блоке 1 параметр Ψ_{n+1} , рассчитанный в первой части алгоритма присваивается переменной $\Psi_{n+1}^* = \Psi_{n+1}$, которая является максимумом ресурса магистралей, достижимом при заданных ограничениях вероятности смещения компонентов за допустимые значения. Далее в блоках 2-6 в цикле находится оптимальное решение задачи, путем перебора частных решений в линейках КЧР. В блоке 3 находится КЧР, для которого $\Psi_{ik} = \Psi_{k+1}^*$. В блоке 4 из множества $X_{ik}=\{x_1, x_2, x_3\}$ выбирается вершина и уровень плотности j , для которого $\Psi_{ikj} = \Psi_{k+1}^*$. В блоке 5 выполняется модификация переменной $\Psi_k = \Psi_{k+1}^* - \rho_{kj}$ на величину ресурса магистралей при выбранном уровне плотности и выбранный номер уровня плотности присваивается переменной решения задачи $K_k^* = j$. Поиск решения заканчивается после выхода к вершине ω_0 .

Разработанный алгоритм реализует оптимизацию выбора параметров посадочных мест методом динамического программирования. Таким образом доказано, что разработанный ранее алгоритм и модели прогнозирования вероятности выполнения допусков на установку компонентов позволяют строить модели задачи оптимизации для разработки программного обеспечения на основе математических методов, гарантирующих получение оптимальных результатов.

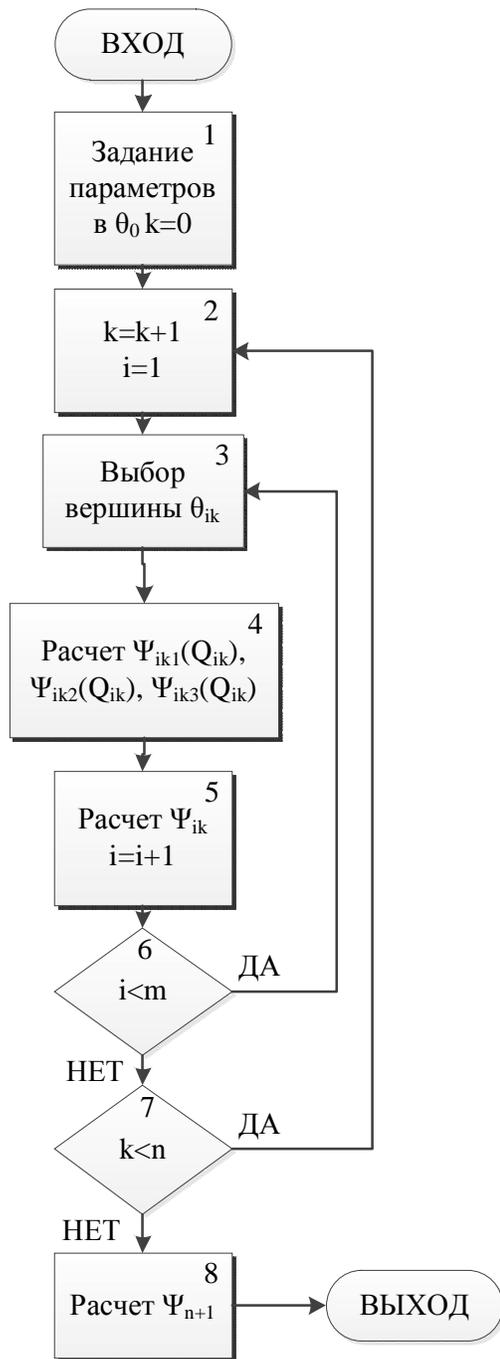


Рисунок 4.19 - Алгоритм разметки
вершин КЧР

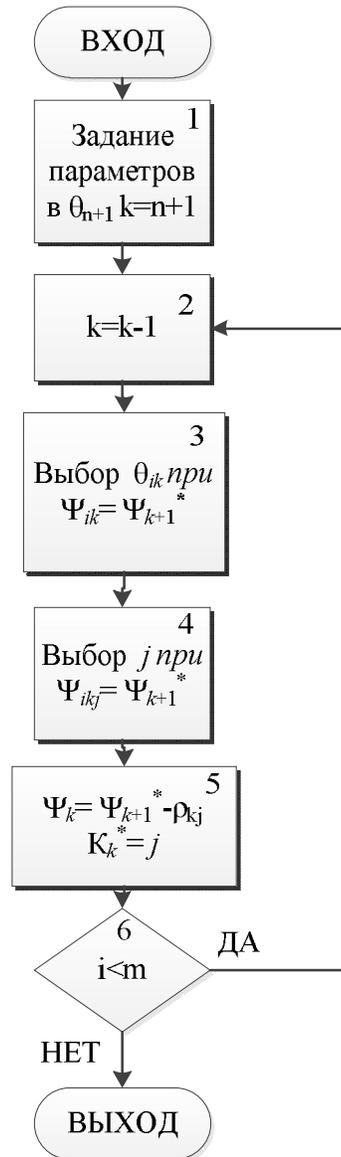


Рисунок 4.20 - Алгоритм получения
решения

Выводы к главе 4

1. Проведена систематизация правил установки компонентов при монтаже на поверхности ПП и разработана математическая модель совмещения вывода с КП, которая позволяет:

- рассчитывать значения допусков на смещение компонента при сборке в зависимости от требований точности,
- структурировать правила определения недопустимых состояний установки,
- применять экспертные системы для обработки.

2. С использованием математическая модель совмещения вывода с КП разработан *алгоритм* прогнозирования дефектов сборки, позволяющие при проектировании ПП:

- учитывать факторы, влияющие на качество собираемых изделий;
- связывать требования допусков к погрешностям сборки с вероятностью нарушением качества установки компонентов;
- формировать у разработчика ПП адекватную модель для контроля принимаемых решений при выборе параметров посадочных мест.

3. На основе метода динамического программирования и алгоритма расчета показателей качества монтажа компонентов разработан алгоритм оптимизации размеров контактных площадок для монтажа компонентов на поверхности, позволяющий:

- находить оптимальное соотношение между требованиями качества монтажа компонентов и обеспечением максимальной плотности монтажа;
- улучшать конструктивные показатели устройств на ПП за счет более рационального использования площади ПП путем предоставления дополнительных ресурсов трассировки межсоединений, не снижая заданные показатели надежности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В условиях повышения скорости обработки цифровой информации, миниатюризации элементной базы и повышения плотности монтажа компонентов переход к прецизионным технологиям ПП приводит к усилению влияния погрешностей конструктивно-технологических параметров ПП на работоспособность радиотехнических устройств. Прогнозирование и контроль отклонения конструктивно-технологических параметров ПП от заданных допусков позволяют повысить надежность узлов радиоаппаратуры за счет снижения рисков нарушения показателей надежности при проектировании и изготовлении прецизионных ПП.

2. На основе методов параметрической надежности радиотехнических устройств разработана *методика*, расширяющая возможности существующего подхода к проектированию ПП быстродействующих цифровых устройств в направлении учета влияния технологических процессов на показатели надежности прецизионных ПП и позволяющая:

- связать значения отклонения от допусков на контролируемое (при проектировании узла) волновое сопротивление печатных проводников с конструктивно-технологическими погрешностями параметров, формируемых в технологическом процессе производства прецизионных ПП;
- прогнозировать показатель надежности ПП по вероятности отказов быстродействующих цифровых устройств из-за конструктивно-технологических погрешностей параметров сигнальных проводников, возникающих в процессе производства прецизионных ПП;
- осуществлять прогнозирование возможностей производства ПП с заданными требованиями на допуски к погрешностям волнового сопротивления;
- снижать риски запуска в производство ПП с низкой надежностью по допускам на параметры межсоединений.

3. На основе метода измерения волнового сопротивления линий связи с помощью метода динамической рефлектометрии и разработанных методов прогнозирования погрешностей проводников предложен способ неразрушающего

контроля ширины проводников с помощью измерения отклонений волнового сопротивления проводника на тестовом образце печатной платы, который не требует проведения прямых измерений ширины проводника с помощью рентгеноскопии или разрушающего контроля, что значительно снижает стоимость и трудоемкость контроля. Предлагаемый способ измерения отклонения ширины печатных проводников от номинальных значений применим для оперативного контроля технологической операции травления печатных плат при мелкосерийном и опытном производстве ПП, когда стоимости внедрения и выполнения операции контроля имеют определяющее значение.

4. На основе метода измерения волнового сопротивления линий связи с помощью метода динамической рефлектометрии и разработанных методов прогнозирования погрешностей проводников предложен способ неразрушающего контроля смещения слоев МПП, в котором погрешность определяется измерением волнового сопротивления проводников тест-купона. Применение способа не требует проведения визуальных измерений смещения слоев МПП под воздействием погрешностей технологического процесса прессования и систем машинного зрения, позволяет оперативно контролировать параметры технологического процесса изготовления печатных плат, что выгодно отличает предлагаемое техническое решение от существующих трудоемких и дорогостоящих способов контроля.

5. Проведена систематизация правил установки компонентов при монтаже на поверхности ПП и разработана математическая модель совмещения вывода с КП, которая позволяет:

- рассчитывать значения допусков на смещение компонента при сборке в зависимости от требований точности,
- структурировать правила определения недопустимых состояний установки,
- применять экспертные системы для обработки.

6. С использованием математическая модель совмещения вывода с КП разработан *алгоритм* прогнозирования дефектов сборки, позволяющие при проектировании ПП:

- учитывать факторы, влияющие на качество собираемых изделий;
- связывать требования допусков к погрешностям сборки с вероятностью нарушением качества установки компонентов;
- формировать у разработчика ПП адекватную модель для контроля принимаемых решений при выборе параметров посадочных мест.

7. На основе метода динамического программирования и алгоритма расчета показателей качества монтажа компонентов разработан алгоритм оптимизации размеров контактных площадок для монтажа компонентов на поверхности, позволяющий:

- находить оптимальное соотношение между требованиями качества монтажа компонентов и обеспечением максимальной плотности монтажа;
- улучшать конструктивные показатели устройств на ПП за счет более рационального использования площади ПП путем предоставления дополнительных ресурсов трассировки межсоединений, не снижая заданные показатели надежности.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АЦП - Аналого-цифровой преобразователь
- ВС - Волновое сопротивление
- ИМС- Интегральная микросхема
- КП - Контактная площадка
- МДП – Метод динамического программирования
- МПП – Многослойная печатная плата
- ПМИЭТ - Поверхностно-монтируемое изделие электронной техники
- ПП- Печатная плата
- РЭА - Радиоэлектронная аппаратура
- САПР - Система автоматизированного проектирования
- СВЧ - Сверхвысокая частота
- СКО - Среднее квадратичное отклонение
- ТО - Технологическая операция
- ТП – Технологический процесс
- ТПП - Технологическая подготовка производства
- ТУ - Техническое условие
- ЦС - Целостность сигнала
- ADS - *Advanced Design System*
- FPGA (*A field-programmable gate array*) - Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС)
- PLQFP - Низкопрофильный пластмассовый плоский корпус с четырехсторонним расположением выводов
- SMD (*Surface-Mount Device*) - Компонент для поверхностного монтажа
- SMT (*Surface Mounting Technology*) - Технология поверхностного монтажа

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аветисов, А.Г. Проектирование печатных плат с применением автоматизированного программного средства и технологии внутреннего монтажа[Текст]: дис. ... кандидата технических наук: 05.02.22 / Аветисов Альберт Георгиевич; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т радиотехники, электроники и автоматики]. - Москва, 2012. - 187 с.: ил. РГБ ОД, 61 13-5/1149.
2. Акулин, А. Волновое сопротивление и многослойные печатные платы / А. Акулин // CHIP NEWS. – 2004. - №5. – С. 56-59.
3. Арнольд Вимерс. Волновое сопротивление и многослойность печатных плат – часть 2 / Арнольд Вимерс. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elart.narod.ru/articles/article35/WiemersImpPart2.pdf>.
4. Арушанов, А.П. Оценка влияния технологических факторов на точность автоматической сборки блоков электронной аппаратуры / А.П. Арушанов, Л.И. Пояркова, И.С. Тюндер. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://refdb.ru/look/2683417.html>.
5. Атопшев, Ю.С. Методика проектирования помехоустойчивых высокоскоростных монтажных плат / Ю.С. Атопшев, М.Н. Ушкар // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы междунар. заоч. науч. конф.(г. Санкт-Петербург, март 2011 г.). – СПб.: Реноме, 2011. – С.11-15.
6. Афанасьев, К.Е. Анализ помех отражения в неоднородных многопроводных линиях передачи сигналов / К.Е. Афанасьев, Е.А. Вершинин, С.Н. Трофимов // Вестник Томского Государственного университета. – 2009. - №1. - С. 16-24.
7. Билибин, К.И. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов / К.И. Билибин [и др.]; под общ. ред. В.А. Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 568 с.
8. Бушминский, И.П. Конструирование и технология пленочных СВЧ микросхем / И.П. Бушминский, Г.П. Морозов. - М.: Сов.радио, 1978. - 144 с.
9. Ватанабе Риочи. Замечательная идея от фирмы Samsung / Ватанабе Риочи // Компоненты и технологии. – 2005. - № 5. – С. 25-27.

10. Газизов, Т.Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях / Т.Р. Газизо; под ред. Н.Д. Малютина. - Томск: Изд-во НТЛ, 2003. - 212 с.

11. Гафт, С. Современные методы обеспечения качества и надежности выпускаемой продукции, практика выбора, внедрения и оптимизации стратегии контроля при производстве современных электронных модулей на ПП / С. Гафт // Поверхностный монтаж. - 2010. - № 4(84). – С. 16-22.

12. ГОСТ 23751-86. Платы печатные. Основные параметры конструкции[Текст]. – Москва: Издательство стандартов, 1986. - 14 с.

13. ГОСТ 23752-79. Платы печатные. Общие технические условия[Текст]. – Москва: Издательство стандартов, 1979. - 34 с.

14. ГОСТ 27716-88. Фотошаблоны печатных плат. Общие технические условия[Текст]. – Москва: Издательство стандартов, 1988. - 14 с.

15. ГОСТ ИЕС 61188-1-2-2013. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 1-2. Общие требования. Контролируемое волновое сопротивление [Текст]. – Москва: Стандартинформ, 2014. - 39 с.

16. ГОСТ ИЕС 61188-5-2-2013. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5-2. Общие требования. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). Дискретные компоненты [Текст]. – Москва: Стандартинформ, 2014. - 42 с.

17. ГОСТ ИЕС 61188-5-3-2013. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5-3. Общие требования. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). Компоненты с выводами в виде «крыла чайки» с двух сторон [Текст]. – Москва: Стандартинформ, 2014. - 27 с.

18. ГОСТ ИЕС 61188-5-5-2013. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5-5. Общие требования. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). Компоненты с выводами в виде «крыла чайки» с четырех сторон [Текст]. – Москва: Стандартинформ, 2015. - 45 с.

19. ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции[Текст]. – Москва: Стандартинформ, 2010. - 12 с.

20. ГОСТ Р МЭК 61188-5-1-2012. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Часть 5-1. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов). Общие требования [Текст]. – Москва: Сандартинформ, 2015. - 61 с.
21. ГОСТ Р МЭК 61191-1-2010. Печатные узлы. Часть 1. Поверхностный монтаж и связанные с ним технологии. Общие технические требования [Текст]. – Москва: Сандартинформ, 2011. - 39 с.
22. ГОСТ Р МЭК 61191-2-2010. Печатные узлы. Часть 2. Поверхностный монтаж. Технические требования [Текст]. – Москва: Сандартинформ, 2011. - 23 с.
23. ГОСТ Р МЭК 61191-3-2010. Печатные узлы. Часть 3. Монтаж в сквозные отверстия. Технические требования [Текст]. – Москва: Сандартинформ, 2011. - 15 с.
24. ГОСТ Р МЭК 61191-4-2010. Печатные узлы. Часть 4. Монтаж контактов. Технические требования [Текст]. – Москва: Сандартинформ, 2011. - 15 с.
25. ГОСТ Р МЭК 61192-1-2010. Печатные узлы. Требования к качеству. Часть 1. Общие технические требования [Текст]. – Москва: Сандартинформ, 2011. - 61 с.
26. ГОСТ Р МЭК 61192-2-2010. Печатные узлы. Требования к качеству. Часть 2. Поверхностный монтаж [Текст]. – Москва: Сандартинформ, 2011. - 54 с.
27. ГОСТ Р МЭК 61192-3-2010. Печатные узлы. Требования к качеству. Часть 3. Монтаж в сквозные отверстия [Текст]. – Москва: Сандартинформ, 2011. - 42 с.
28. ГОСТ Р МЭК 61192-4-2010. Печатные узлы. Требования к качеству. Часть 4. Монтаж контактов [Текст]. – Москва: Сандартинформ, 2011. - 26 с.
29. Дембицкий, Н.Л. Оптимизация выбора оборудования для производства бортовых радиотехнических комплексов / Н.Л. Дембицкий, А.В. Луценко, Фам Вьет Ань. – Электрон. журн. – Труды МАИ, 2015 - № 81. – режим доступа к журн.: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=57879>.

30. Дембицкий, Н.Л. Применение методов искусственного интеллекта в проектировании и производстве РТУ: Монография / Н.Л. Дембицкий, А.В. Назаров. – М.: МАИ, 2009. – 228 с.

31. Дембицкий, Н.Л. Расчет рисков в автоматизированной системе покрытия комплексов радиоаппаратуры унифицированными блоками / Н.Л. Дембицкий, Д.Н. Дембицкий, Фам Вьет Ань // Авиакосмическое приборостроение. – 2014. - № 8. - С. 3-9.

32. Дембицкий, Н.Л. Способ контроля отклонений ширины проводников печатной платы от номинальных значений / Н.Л. Дембицкий, Фам Вьет Ань // Заявка № 2016115784. Зарегистрирован 22.04.2016 г.

33. Дембицкий, Н.Л. Тест-купон и способ контроля погрешностей совмещения слоев многослойной печатной платы / Н.Л. Дембицкий, Фам Вьет Ань, А.М. Петраков // Заявка № 2016126038 Зарегистрирована 29.06.2016 г.

34. Дембицкий, Н.Л. Устройство контроля технологической погрешности ширины проводников печатной платы / Н.Л. Дембицкий, Фам Вьет Ань, А.М. Петраков // Заявка № 2016115787. Зарегистрирован 22.04.2016 г.

35. Дембицкий, Н.Л. Учет влияния погрешностей технологического процесса на выход годных при изготовлении высокочастотных устройств на печатных платах / Н.Л. Дембицкий, Фам Вьет Ань // Доклады ТУСУРа. – 2016. – том 19. № 1. - С. 9-13.

36. Дембицкий, Н.Л. Экспертная система технологической подготовки процесса сборки и монтажа узлов бортовой радиоаппаратуры / Н.Л. Дембицкий, А.В. Луценко, Фам Вьет Ань. – Электрон. журн. – Труды МАИ, 2015 - № 83. – режим доступа к журн.: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62213>.

37. Джексон, П. Введение в экспертные системы / П. Джексон. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 624 с.

38. Джерон, де Гроот. Уменьшение уровня дефектов установки компонентов до 10 ppm в непрерывном процессе производства / Джерон де Гроот // Производство электроники: Технологии, оборудование, материалы. - 2008. - № 2. – С. 59-62.

39. Джонсон, Г. Высокоскоростная передача цифровых данных: высший курс черной магии / Г. Джонсон, М. Грэхем. – М.: ИД Вильямс, 2005. – 1017 с.
40. Джонсон, Г. Конструирование высокоскоростных цифровых устройств: начальный курс черной магии. : Пер. с англ. / Г. Джонсон, М. Грэхем. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 624 с.
41. Достанко, А.П. Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства: Учебник / А.П. Достанко, В.Л. Ланин, А.А. Хмыль, Л.П. Ануфриев; под общ. ред. А.П. Достанко. – Минск: Вышэйшая школа, 2002. – 415 с.
42. Егоров, Г. Точность автоматов установки компонентов / Г. Егоров // Технологии в электронной промышленности. - 2005. - № 3. – С. 64-66.
43. Елшанский, В.Б. Основы технологии поверхностного монтажа: учебное пособие / В.Б. Елшанский, Л.П. Елшанская. – Чернигов: Деснянська правда, 2006. – 153с.
44. Зыонг, Дык Ха. Разработка регрессионной модели для расчета площади печатной платы функциональной ячейки / Зыонг Дык Ха, Фам Вьет Ань – Электрон. журн. – Труды МАИ, 2010 - № 41. – режим доступа к журн.: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=23795>.
45. Иевлев, В.И. Анализ точности производства электронных средств : учебное пособие / В. И. Иевлев. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2010. 103 с.
46. Калихман, И.Л. Динамическое программирование в примерах и задачах: Учеб.пособие / И.Л. Калихман, М.А. Войтенко. – М.: Высш. школа, 1979. – 125 с.
47. Кечиев, Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л.Н. Кичиев – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
48. Клюквин, Н. Практические аспекты электрического контроля собранных печатных модулей / Н. Клюквин // «Поверхностный монтаж». – 2010. - № 2(82). - С. 20-24.

49. Князев, А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. - М.: Радио и связь, 1989. - 224 с.
50. Кузьмин, В.И. Отечественное оборудование для сборочного производства печатных узлов / В.И. Кузьмин, Е. Кузьмина // Электронные компоненты. – 2004. - № 11.
51. Ланин, В. Сборка электронных модулей с поверхностным монтажом в мелкосерийном и опытном производстве / В. Ланин, И. Петухов, А. Царюк // Технологии в электронной промышленности. - 2011. - № 3. – С. 49-52.
52. Лейтес, И. Травление проводящего рисунка современных многослойных печатных плат / И. Лейтес // Технологии в электронной промышленности. – 2014. - № 7. - С. 60-63.
53. Липкин, Е. «Бессвинцовые» автоматы установки компонентов или влияние бессвинцовой технологии на конструкцию автоматов / Е. Липкин // Поверхностный монтаж. - 2010. - № 5(85). – С. 22-25.
54. Липкин, Е. Современные тенденции развития сборочно-монтажных производств аппаратуры специального назначения / Е. Липкин // Вектор высоких технологий. – 2013. - №2(2). – С. 51-55.
55. Малютин, Н.Д. Многосвязные полосковые структуры и устройства на их основе / Н.Д. Малютин. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. - 164 с.
56. Медведев, А. Анатомия сквозного металлизированного отверстия / А. Медведев, С. Арсентьев // Технология в электронной промышленности. – 2008. - №5. – С. 84-87.
57. Медведев, А. Печатные платы. Требования для поверхностного монтажа / А. Медведев // Компоненты и технологии. – 2007. - №10. – С. 164-168.
58. Медведев, А. Плотность межсоединений электронных компонентов / А. Медведев, В. Можаров // Печатный монтаж. – 2011. - №3. – С. 140-145.
59. Медведев, А. Современные компоновки микросхем / А. Медведев // Компоненты и технологии. – 2007. - № 2.

60. Медведев, А. Электронные компоненты и монтажные подложки. Постоянная интеграция / А. Медведев // Компоненты и технологии. – 2006. - №12.
61. Медведев, А.М. Сборка и монтаж электронных устройств / А.М. Медведев. – М.: Техносфера, 2007. – 256 с.
62. Можаров, В.А. Адаптация техпроцесса подготовки производства печатных плат высокого класса точности под заданные параметры геометрической стабильности базового материала / В.А. Можаров, К.В. Шуман. – Электрон. журн. - Труды МАИ, 2012. - № 50. – режим доступа к журн.: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28828>.
63. Можаров, В.А. Обеспечение пространственного совмещения элементов межсоединений в многослойных печатных структурах. [Текст]: дис. ... кандидата технических наук: 05.11.14 / Можаров Владимир Александрович; [Место защиты: Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана].- Москва, 2013. - 149 с.
64. Мордкович, Е. Стратегический выбор поставщика и технологии-способ избежать тупиковой ситуации / Е.Мордкович // «Поверхностный монтаж». – 2012. - № 4(96). - С. 22-25.
65. Москалев, А.И. Технология поверхностного монтажа элементов на печатные платы: Учебное пособие. / А.И. Москалев, М.Л. Сокольский. – М.: Изд-во МАИ, 1994. – 56 с.
66. Насонов, А. Что и как можно и нужно проверять после сборки печатной платы / А. Насонов // Технологии в электронной промышленности. - 2006. - № 5. – С. 38-40.
67. Нинг-Ченг Ли. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и flip chip технологии / Ли Нинг-Ченг. – М.: Издательский дом «Технологии», 2006. – 392 с.
68. Обзор систем автоматизированного проектирования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://vstn.ru/assets/files/pdf/Sistemy%20avtomatizirovannogo%20proektirovaniya%20\(SAPR\).pdf](http://vstn.ru/assets/files/pdf/Sistemy%20avtomatizirovannogo%20proektirovaniya%20(SAPR).pdf).

69. Овчинников, В.А. Автоматизация проектирования и технология производства печатных плат: учебное пособие / В.А. Овчинников, А.Н. Васильев, В.В. Лебедев. - Тверь: ТГТУ, 2009. - 234 с.
70. Паллием, Вейн. Проектируем платы с BGA / Вейн Паллием (перевод Ю. Потапова) // EDA Expert. – 2002. - №5(68). – С. 48-51.
71. Патент RU 2001538 С1 МПК H05K/18: Цветков В.В., Галецкий Ф.П., Горбатов В.Е., Иванов В.Н. Устройство для контроля слоев печатных плат патента.
72. Полежаев, М.О. Моделирование и верификация аппаратно-программного комплекса для обеспечения целостности сигналов при проектировании вычислительных систем[Текст]: автореф. дис. ... кандидата технических наук: 05.13.05 / Полежаев Максим Олегович; [Место защиты: ФГУП Научно-исследовательский и экспериментальный Институт автомобильной электроники и электрооборудования]. - Москва, 2014. - 20 с.
73. Попов, С. Выравнивание задержек сигналов Проблемы и решения / С. Попов, Ю. Попов // Печатный монтаж. – 2013. - №5. – С. 184-192.
74. Проектирование многослойных печатных плат высокой сложности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://electrolib.com/library/pcb/PCBtech_Complex-PCB.pdf.
75. Русяев, Н.Н. Краткие сведения о среде проектирования Microwave Office / Н.Н. Русяев. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eurointech.ru/index.sema?a=pages&id=232>.
76. Смертина, Т. Высокоточное травление. От теории к практике / Т. Смертина // Технологии в электронной промышленности. – 2008. - № 3. - С. 12-19.
77. Смирнов, А.М. Анализ влияния подтравов печатных проводников на волновое сопротивление линии передачи в печатных платах / А.М. Смирнов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elcut.ru/publications/smironov.pdf>.
78. Сорокин, С.А. Разработка базовой технологии моделирования линий связи печатных плат высокопроизводительных вычислительных комплексов[Текст]: дис. ... кандидата технических наук: 05.13.05 / Сорокин

Сергей Александрович; [Место защиты: ФГУП Научно-исследовательский и экспериментальный Институт автомобильной электроники и электрооборудования]. - Москва, 2016. - 136 с.

79. Суанов, Т.А. Моделирование высокоскоростных линий передачи в многослойных печатных платах / Т.А. Суанов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. - №11 (148). – С. 186-194.

80. Терешкин, В. Травление печатных плат и регенерация травильных растворов / В. Терешкин, Ж. Фантгоф, Л. Григорьева // Технологии в электронной промышленности. - 2007. - № 3.- С. 26-29.

81. Толщина материала. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.pcbtech.ru/pages/view_page/118.

82. Топоров, С. Допуски на элементы печатных плат: то, что вы не знали, но стеснялись спросить / С. Топоров // Производство электроники технологии, оборудование, материалы. – 2007. - №1. – С. 22-24.

83. Ушкар М.Н. Конструирование электронно-вычислительных средств. – М., издательство МАИ, 2007, 60 с.

84. Фомин, А.В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре / А.В. Формин, В.Ф. Борисов, В.В. Чермошенский. - М.: «Сов.радио», 1973. - 128 с.

85. Фомин, А.В. Расчет электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. В.П. Гусева и А.В.Фомина. М.: «Сов.радио», 1963. - 367 с.

86. Чернышов, А. Классы точности печатных плат и современные технологии / А. Чернышов // Печатный монтаж. – 2009. - №6. – С. 18-21.

87. Шведюк, Г. EVOлюция оборудования для производства электроники / Г. Шведюк // Технологии в электронной промышленности. - 2012 - № 5. – С. 34-36.

88. Шкундина, С. Анизотропное травление печатных плат / С. Шкундина // Печатный монтаж. – 2011. - №6(00035). – С. 158-168.

89. Achar, R. Simulation of high-speed interconnects / R. Achar, M.S. Nakhla // Proc. of the IEEE. - 2001. - V.89. - No.5. - P. 693–728.

90. Board Systems Design and Verification. Mentor Graphics Corporation, 2001, 15 p.
91. Bogatin, E. Signal Integrity – Simplified / E. Bogatin - Prentice - Hall PTR, 2003. - 608 p.
92. Brooks D. Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design / D. Brooks — Prentice Hall PTR, 2003. - 432 p.
93. Brooks, D. PCB Impedance Control: Formulas and Resources / D. Brooks // Printed Circuit Design Magazine, 1998, March, p. 4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ultracad.com/articles/formula.pdf>.
94. Calculation of PCB Track Impedance / Andrew J Burkhardt, Christopher S Gregg and J Alan Staniforth. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.polarinstruments.com/support/cits/IPC1999.pdf>.
95. Chuang, Shui-Fa. Misalignment inspection of multilayer PCBs with an automated X-ray machine vision system / Shui-Fa Chuang, Wen-Tung Chang, Chih-Cheng Lin, Yeong-Shin Tarn // Int J Adv Manuf Technol. – 2010. 51:995–1008. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/226733272_Misalignment_inspection_of_multilayer_PCBs_with_an_automated_X-ray_machine_vision_system.
96. CITS889s – impedance measurement made easy. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.polarinstruments.com/products/cits/cits880s.html> [94]
97. Djordjevic, A.R. Analysis of time response of lossy multiconductor transmission line networks / A.R. Djordjevic, T.K. Sarkar // IEEE Trans. Microwave Theory Techniq. - 1987. - V.35. - No.10. - P. 898–908.
98. Guidelines for Designing High-Speed FPGA PCBs. Altera Corporation AN-315, ver. 1.1, 2004. – 12p.
99. How-Siang Yap. Productivity by Design: ADS 2008 Reduces Steps to Simulation and Verification January 2008 High Frequency Electronics / Yap How-Siang. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.highfrequencyelectronics.com/Jan08/HFE0108_Agilent.pdf.

100. IPC-2141. Controlled Impedance Circuit Board and High Speed Logic Design. - Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, 1996. – 70 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dynamixtechnology.com/docs/ipc-2141s.pdf>.

101. IPC-6012B. Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards. – Association Connecting Electronics Industries, 2004. – 56 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.readapcb.com/Data/readapcb/upload/file/20160409/IPC-6012B%20for%20Qualification%20and%20Performance.pdf>.

102. Messner, G. Analysis of the Density and Yield Relationships Leading Toward the Optimal Interconnection Methods / G. Messner, W. Smit // Proceedings of Printed Circuits World Conference VI. San Francisco, CA. - 1993. – pp 19 1-20.

103. Patel, G. Signal Integrity Characterization of Printed Circuit Board Parameters / G. Patel, K. Rothstein — TERADYNE, 2002. - 8 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.124.3328&rep=rep1&type=pdf>.

104. TXB0108 // Texas Instruments. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/txb0108.pdf>.

105. Wadell, Brian C. Transmission line design handbook / Brian C. Wadell. USA, 1991. – 505 p.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ
ЗАВИСИМОСТЕЙ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ
КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ПЕЧАТНЫХ
ПЛАТ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ УЗЛОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ**

Цель: Выбор по критерию точности аналитических выражений для расчета значений волнового сопротивления от параметров проводников и ПП.

Анализ точности двух вариантов аналитических выражений, которые выбраны из стандарта IPC2141 (обозначим в таблице результата: Формула группы Ф1) [100] и литературы [40] (обозначим в таблице результата: Формула группы Ф2) выполним с помощью САД ADS2008, которая базируется на фундаментальных методах моделирования, используется в при проектировании СВЧ схем в радиопромышленности.

Выбирается типичный материал диэлектрики FR4 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 4,5$. В работе [3] написано, что ожидаемое отклонение величины ϵ_r лежит в диапазоне $\pm 0,2$.

Стандартная толщина меди (печатных проводников) часто составляет 17мкм (1/2 oz) или 35 мкм (1 oz). В данной работе используется медь с толщиной $t = 35$ мкм. Ожидаемое отклонение толщины меди лежит в диапазоне $\pm 1,0$ мкм. [3]

В статье [81] приведены варианты и толщины различных материалов диэлектрики для МПП (таблицы А.1 и А.2). Следует учитывать, что допуск на толщину материала обычно составляет до $\pm 10\%$, поэтому и допуск на толщину готовой многослойной платы не может быть менее $\pm 10\%$.

Таблица А.1 - «Ядра» FR4 для внутренних слоев печатной платы

Толщина диэлектрика и толщина меди	5 мкм	17 мкм	35 мкм	70 мкм	105 мкм
0,050 мм	•	•	•	3	3
0,075 мм	м	•	•	3	3
0,100 мм	•	•	•	3	3

Толщина диэлектрика и толщина меди	5 мкм	17 мкм	35 мкм	70 мкм	105 мкм
0,150 мм	з	•	•	з	з
0,200 мм	м	•	•	з	з
0,250 мм	з	•	•	•	з
0,300 мм	з	•	•	•	з
0,350 мм	м	•	•	з	з
0,450 мм	•	•	•	з	з
0,710 мм	м	•	•	з	з
0,930 мм	м	•	•	•	з
1,000 мм	•	•	•	•	з
Более 1 мм	•	•	•	•	з

• - Как правило, в наличии;

з - По запросу (имеется в наличии не всегда) м - Можно изготовить;

Примечание: для обеспечения надежности готовых плат важно знать, что для внутренних слоев мы предпочитаем использовать ядра с фольгой 35 мкм, а не 18 мкм (даже при ширине проводника и зазора 0,1 мм). Это повышает надежность печатных плат.

Таблица А.2 - Препрег («связующий» слой) для многослойных печатных плат

Тип препрега	Толщина после прессования	Возможное отклонение
Основные		
1080	0,066 мм	-0,005/+0,020 мм
2116	0,105 мм	-0,005/+0,025 мм
7628	0,180 мм	-0,005/+0,025 мм
Дополнительно		
106 no flow	0,050 мм	-0,005/+0,020 мм
1080 no flow	0,066 мм	-0,005/+0,020 мм
2113	0,100 мм	-0,005/+0,025 мм

Допустимое количество смежных слоев препрега в МПП – от 2 до 4. Иногда можно использовать одиночный слой. Для меди 35 мкм можно использовать 1 слой только для 2116. [74]

В данной работе при рассмотрении микрополосковой линии (внешнего слоя) выбирается диэлектрик (препрег) с толщиной $h_{ms} = 105$ мкм, а для внутреннего слоя выбирается ядро с толщиной 250 мкм, поэтому при рассмотрении полосковой линии предложена толщина диэлектрики $h_s = 500$ мкм.

В приложении В диссертации, а также в работе [3] проведено исследование влияния параметров (диэлектрической проницаемости ϵ_r , толщины меди t , толщины диэлектрики h , ширины проводника w) на значение волнового сопротивления проводника. Исследование показало, что на значение волнового сопротивления проводника сильно влияет погрешность ширины проводника.

Поэтому, в данной работе будет проведена проверка формул при варьировании значений ширины проводника. Ширина печатных проводников изменяется в диапазонах, соответствующих классам точности 4, 5, 6, 7 (таблица А.3).

Результаты анализа микрополосковой линии приведены в таблице А.3 и на рисунке А.1.

Таблица А.3 - Результаты анализа микрополосковой линии

Класс точности	Параметры микрополосковой линии $h_{ms} = 0,105$ (мм); $t = 0,035$ (мм); $\epsilon_r = 4,5$	Значение волнового сопротивления, Z (Ом)		
	Ширина проводника w (мм)	ADS2008	Φ1	Φ2
7	0,050	82,086	76,338	82,166
	0,055	79,765	74,469	79,843
	0,060	77,610	72,694	77,690

Класс точност и	Параметры микрополосковой линии $h_{ms} = 0,105$ (мм); $t = 0,035$ (мм); $\varepsilon_r = 4,5$		Значение волнового сопротивления, Z (Ом)		
	Ширина проводника w (мм)	ADS2008	$\Phi 1$	$\Phi 2$	
	0,065	75,597	71,001	75,685	
	0,070	73,710	69,385	73,809	
6	0,075	71,935	67,839	72,046	
	0,080	70,261	66,356	70,385	
	0,085	68,676	64,932	68,815	
	0,090	67,173	63,562	67,327	
	0,095	65,745	62,242	65,915	
5	0,100	64,386	60,970	64,571	
	0,105	63,089	59,740	63,290	
	0,110	61,850	58,552	61,991	
	0,115	60,666	57,401	60,814	
	0,120	59,531	56,286	59,686	
	0,125	58,443	55,205	58,603	
	0,130	57,398	54,155	57,562	
	0,135	56,394	53,135	56,560	
	0,140	55,428	52,143	55,596	
	0,145	54,497	51,178	54,667	
4	0,150	53,600	50,238	53,771	
	0,155	52,735	49,322	52,905	
	0,160	51,899	48,428	52,070	
	0,165	51,092	47,557	51,262	
	0,170	50,311	46,706	50,480	
	0,175	49,556	45,874	49,724	

Класс точност и	Параметры микрополосковой линии $h_{ms} = 0,105$ (мм); $t = 0,035$ (мм); $\varepsilon_r = 4,5$	Значение волнового сопротивления, Z (Ом)		
	Ширина проводника w (мм)	ADS2008	$\Phi 1$	$\Phi 2$
	0,180	48,824	45,062	48,991
	0,185	48,116	44,267	48,281
	0,190	47,429	43,490	47,593
	0,195	46,763	42,729	46,925
	0,200	46,117	41,984	46,277
	0,205	45,489	41,254	45,647
	0,210	44,880	40,538	45,036
	0,215	44,287	39,837	44,441
	0,220	43,711	39,149	43,863
	0,225	43,151	38,473	43,300
	0,230	42,606	37,811	42,753
	0,235	42,075	37,160	42,219
	0,240	41,558	36,521	41,700
	0,245	41,054	35,893	41,194
	0,250	40,563	35,275	40,700

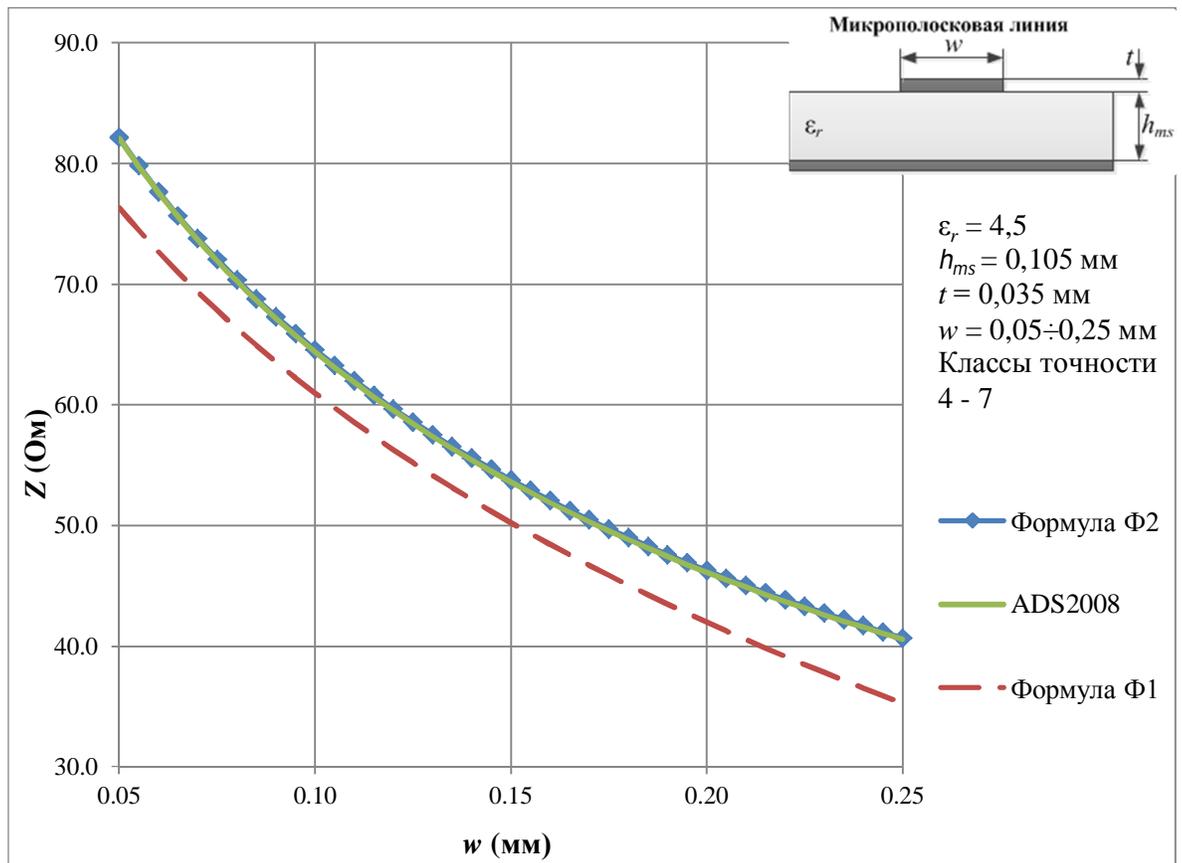


Рисунок А.1 - Зависимость волнового сопротивления (Z) от ширины проводника (w) для микрополосковой линии

Исследования зависимостей показывают максимальные ошибки расчета формул по сравнению с результатами моделирования с помощью программы ADS2008:

В диапазоне значений ширины проводника ($w = 150 \div 250$ мкм) (класса точности 4):

- для формулы (2.5) (Ф1): -13,04%;
- для формулы (2.9-2.11) (Ф2): 0,35%.

В диапазоне значений ширины проводника ($w = 100 \div 145$ мкм) класса точности 5:

- для формулы (2.5) (Ф1): -6,1%;
- для формулы (2.9-2.11) (Ф2): 0,32%.

В диапазоне значений ширины проводника ($w = 75 \div 95$ мкм) класса точности

б:

- для формулы (2.5) ($\Phi 1$): -5,7%;
- для формулы (2.9-2.11) ($\Phi 2$): 0,26%.

В диапазоне значений ширины проводника ($w = 50 \div 70$ мкм) класса точности 7:

- для формулы (2.5) ($\Phi 1$): -7,0%;
- для формулы (2.9-2.11) ($\Phi 2$): 0,13%.

С помощью программы ADS2008, $Z_0 = 50$ Ом (при $\epsilon_r = 4,5$; $h_{ms} = 0,105$ мм; $t = 0,035$ мм; $w = 0,172$ мм). При этом условии,

- по формуле (2.5) ($\Phi 1$): $Z_0 = 46,368$ Ом (ошибка: -7,26%);
- по формуле (2.9-2.11) ($\Phi 2$): $Z_0 = 50,169$ Ом (ошибка: 0,34%).

Результаты анализа полосковой линии приведены в таблице А.4 на рисунке А.2.

Таблица А.4 - Результаты анализа полосковой линии

Класс точности	Параметры микрополосковой линии $h_s = 0,5$ (мм); $t = 0,035$ (мм); $\epsilon_r = 4,5$	Значение волнового сопротивления, Z (Ом)		
	Ширина проводника w (мм)	ADS2008	$\Phi 1$	$\Phi 2$
7	0,050	68,118	71,818	72,084
	0,055	67,012	70,349	70,565
	0,060	65,942	68,952	69,123
	0,065	64,905	67,620	67,751
	0,070	63,901	66,349	66,446
6	0,075	62,927	65,132	65,200
	0,080	61,983	63,966	64,010
	0,085	61,066	62,845	62,870
	0,090	60,176	61,768	61,777
	0,095	59,311	60,730	60,728
5	0,100	58,472	59,728	59,718
	0,105	57,655	58,761	58,745

Класс точност и	Параметры микрополосковой линии $h_s = 0,5$ (мм); $t = 0,035$ (мм); $\epsilon_r = 4,5$	Значение волнового сопротивления, Z (Ом)		
	Ширина проводника w (мм)	ADS2008	$\Phi 1$	$\Phi 2$
4	0,110	56,861	57,826	57,806
	0,115	56,089	56,921	56,900
	0,120	55,337	56,044	56,023
	0,125	54,605	55,193	55,175
	0,130	53,893	54,367	54,352
	0,135	53,198	53,565	53,554
	0,140	52,521	52,785	52,780
	0,145	51,862	52,025	52,027
	0,150	51,218	51,286	51,295
	0,155	50,591	50,565	50,582
	0,160	49,979	49,862	49,888
	0,165	49,381	49,177	49,211
	0,170	48,797	48,507	48,551
	0,175	48,227	47,853	47,907
	0,180	47,671	47,214	47,654
	0,185	47,126	46,589	47,110
0,190	46,595	45,977	46,579	
0,195	46,075	45,379	46,059	
0,200	45,566	44,792	45,550	
0,205	45,069	44,218	45,053	
0,210	44,582	43,655	44,567	
0,215	44,106	43,103	44,091	
0,220	43,640	42,562	43,625	
0,225	43,183	42,031	43,169	
0,230	42,736	41,509	42,722	

Класс точности	Параметры микрополосковой линии $h_s = 0,5$ (мм); $t = 0,035$ (мм); $\epsilon_r = 4,5$	Значение волнового сопротивления, Z (Ом)		
	Ширина проводника w (мм)	ADS2008	Ф1	Ф2
	0,235	42,299	40,997	42,284
	0,240	41,870	40,495	41,855
	0,245	41,449	40,001	41,435
	0,250	41,038	39,515	41,023

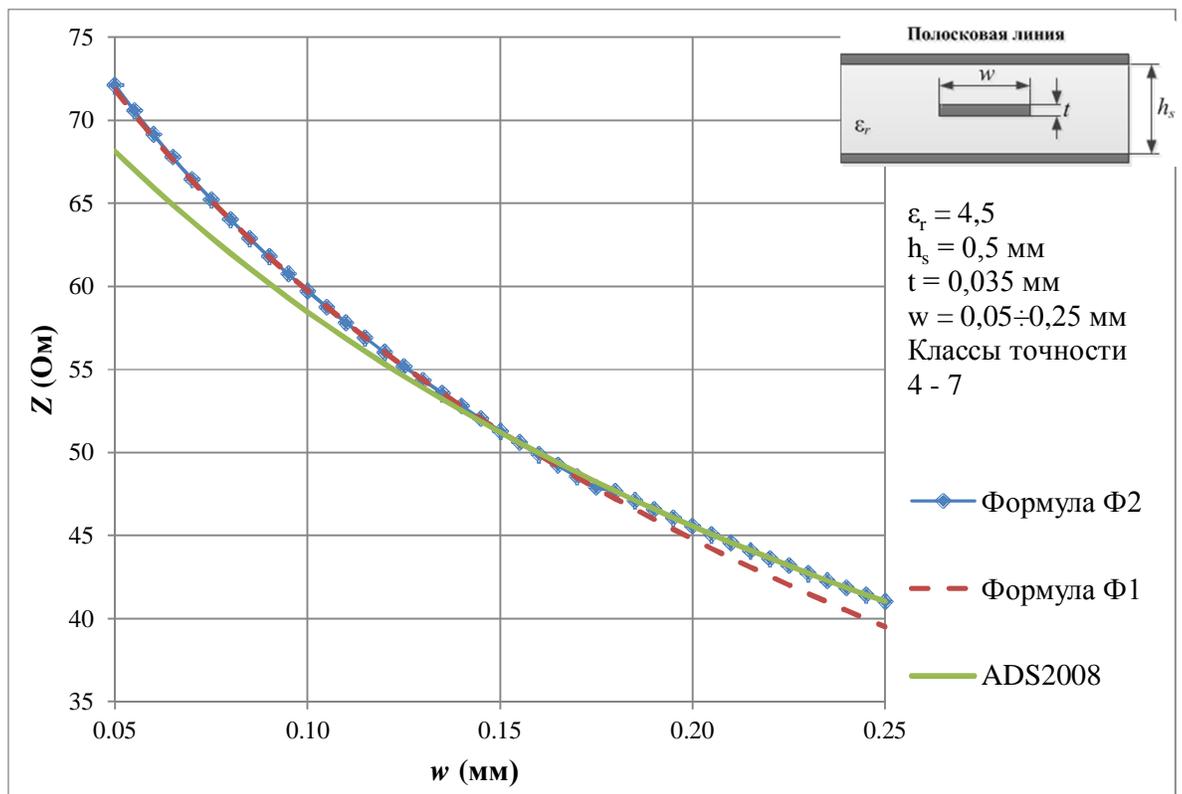


Рисунок А.2 - Зависимость волнового сопротивления (Z) от ширины проводника (w) для полосковой линии

Максимальная ошибка расчета точной формулы по сравнению с программой ADS2008:

В диапазоне значений ширины проводника ($w = 150 \div 250$ мкм) класса точности 4:

- для формулы (2.6) ($\Phi 1$): -3,71%;
- для формулы (2.12-2.13) ($\Phi 2$): 0,66%.

В диапазоне значений ширины проводника ($w = 100 \div 145$ мкм) класса точности 5:

- для формулы (2.6) ($\Phi 1$): 2,15%;
- для формулы (2.12-2.13) ($\Phi 2$): 2,13%.

В диапазоне значений ширины проводника ($w = 75 \div 95$ мкм) класса точности 6:

- для формулы (2.6) ($\Phi 1$): 3,5%;
- для формулы (2.12-2.13) ($\Phi 2$): 3,61%.

В диапазоне значений ширины проводника ($w = 50 \div 70$ мкм) класса точности 7:

- для формулы (2.6) ($\Phi 1$): 5,43%;
- для формулы (2.12-2.13) ($\Phi 2$): 5,82%.

С помощью программы ADS2008, $Z_0 = 50$ Ом (при $\epsilon_r = 4,5$; $h_s = 0,5$ мм; $t = 0,035$ мм; $w = 0,15982$ мм). При этом условии,

- по формуле (2.6) ($\Phi 1$): $Z_0 = 49,887$ Ом (ошибка: -0,23%);
- по формуле (2.12-2.13) ($\Phi 2$): $Z_0 = 49,913$ Ом (ошибка: -0,17%).

Результаты анализа точности в диапазоне значений ширины проводников приведены в таблице А.5. Результаты анализа точности формул при номинальном значении волнового сопротивления 50 Ом ($\pm 10\%$) приведены в таблице А.6.

Таблица А.5- Анализ точности формул расчета волнового сопротивления

	Максимальная ошибка расчета							
	Класс точности 4 ($w=0,15 \div 0,25$ мм)		Класс точности 5 ($w=0,1 \div 0,15$ мм)		Класс точности 6 ($w=0,075 \div 0,1$ мм)		Класс точности 7 ($w=0,05 \div 0,075$ мм)	
	$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 1$	$\Phi 2$
Микрополосковая линия	-13,04%	0,35%	-6,1%	0,32%	-5,7%	0,26%	-7,0%	0,13%
Полосковая линия	-3,71%	0,66%	2,15%	2,13%	3,5%	3,61%	5,43%	5,82%

Таблица А.6 - Анализ точности формул расчета волнового сопротивления в точке $Z=50 \text{ Ом} (\pm 10\%)$

	Волновое сопротивление по ADS2008, Z_0 (Ом)	Ф1		Ф2	
		Z_0 (Ом)	Ошибка	Z_0 (Ом)	Ошибка
Микрополосковая линия	50 ($\pm 10\%$)	46,368	-7,26%	50,169	0,34%
Полосковая линия	50 ($\pm 10\%$)	49,887	-0,23%	49,913	-0,17%

Приведенные приближенные соотношения Ф2 позволяют рассчитать волновое сопротивление для микрополосковой линии с погрешностью менее 0,35% во всем диапазоне изменения значений ширины проводника для классов точности от 4-го до 7-го. Поэтому можно рекомендовать использование данной группы формул для анализа печатных проводников в виде микрополосковых линий.

При расчете ВС печатных проводников в виде полосковых линий большую точность в области типовых значений параметров по классам точности 4-7 дают формулы группы Ф1. Выбранные аналитические выражения позволяют в области типовых значений параметров межсоединений ПП получать погрешности вычислений ВС для полосковой линии: 0,66% (4-й класс точности), 2,13% (5-й класс точности), 3,5% (6-й класс точности). Волновое сопротивление полосковых линий может быть рассчитано для 7-го класса точности с погрешностью менее 5,5%.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПРИМЕР ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛЬ ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛА

Условия задачи:

1. Фрагмент схемы устройства для обработки цифровых сигналов на основе микросхеме FPGA (рисунок Б.1) состоит из 2-х микросхем.
2. Схема выполнена на микросхемах $X1$ (ПЛИС XC3S500E-4PQG208C), $X2$ (Преобразователь логического уровня TXB0108) и разъеме J .
3. При проектировании схем разработчик выполнил условия синхронизации задержек при подаче сигналов с выходов микросхемы $X1$ на разъем J перед передачей на вход приемника сигналов на внешнем устройстве.
4. В результате разработки ПП на линии передачи цифрового сигнала с выхода $X1$ до разъема J через микросхему $X2$ существуют четыре металлизированного переходного отверстия и несколько поворотов на 90° , которые являются неоднородностями линии передачи. Отверстие с типичными размерами показано на рисунке Б.3. Кроме того, на входах микросхем существуют входные емкости, которые создают неоднородность линии передачи [47]. На линии передачи цифрового сигнала с выхода $X1$ прямо до разъема J неоднородности отсутствуют.
5. Материал FR4 выбирается в качестве основания МПП, его диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 4,5$.
6. Параметры импульсов: длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 5$ нс ($f = 100$ МГц), длительность фронта импульса $\tau_{\text{фр}} = 0$. (Из FPGA преобразован прямоугольный высокочастотный импульс).

Цель исследования: показать степень зависимости задержек сигналов от погрешности волнового сопротивления.

Решение:

Эквивалентная схема передачи сигналов по линиям связи показана на рисунке Б.2.

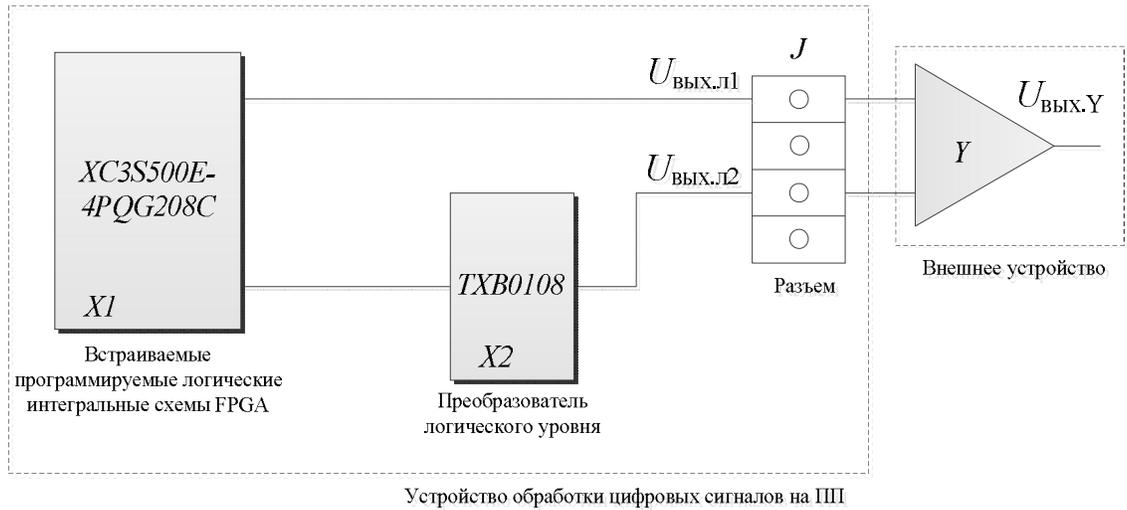


Рисунок Б.1 - Фрагмент логической схемы цифрового устройства

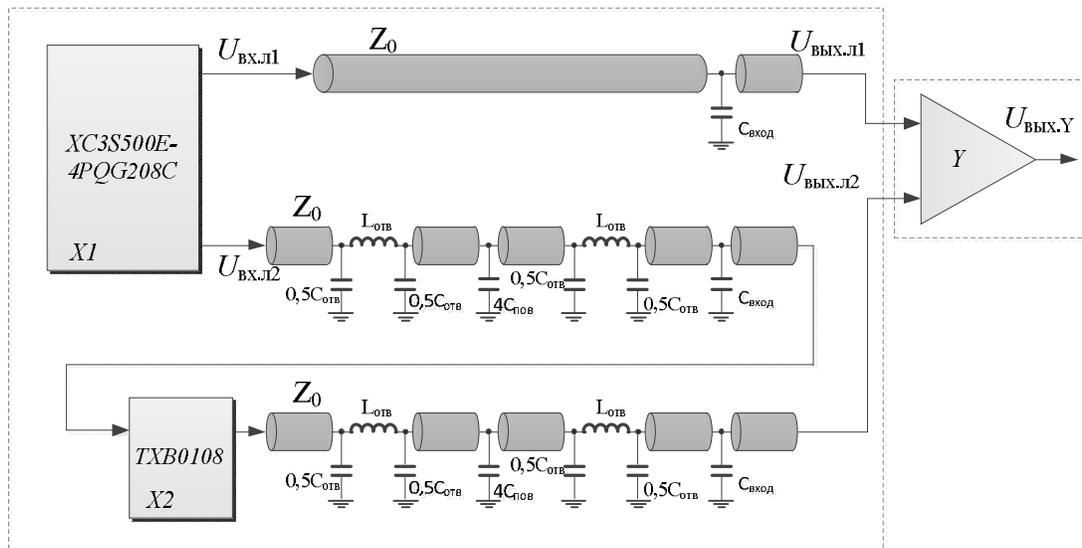


Рисунок Б.2 - Эквивалентная схема фрагмента с учетом паразитных параметров (неоднородностей) печатных проводников

Определение паразитных индуктивности и емкости при наличии неоднородности

В книге Кичиева Л.Н. [47] приведены методики определения паразитных индуктивности и емкости при наличии неоднородности.

1- Наличие металлизированного отверстия (рисунок Б.3) вызывает неоднородность линии передачи. При этом паразитные индуктивность и емкость

приводят к расширению фронта цифрового сигнала. Эквивалентная схема металлизированного отверстия показана на рисунке Б.4.

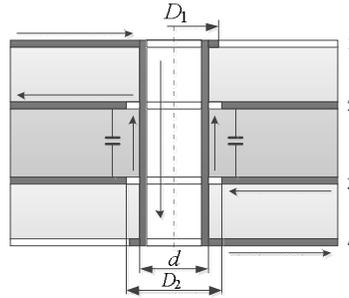


Рисунок Б.3 – Металлизированное переходное отверстие: 1, 4 – сигнальные слои; 2 – слой заземления; 3 – слой питания [47]

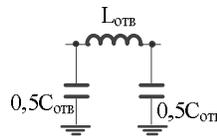


Рисунок Б.4 - Эквивалентная схема металлизированного отверстия

Емкость металлизированного переходного отверстия определяется по формуле [47]:

$$C_{\text{отв}} = 0,055 \cdot \epsilon_r \cdot h \cdot \frac{D_1}{D_2 - D_1}, \text{ пФ}, \quad (\text{Б.1})$$

где ϵ_r – диэлектрическая проницаемость платы (выбирается $\epsilon_r = 4,5$ для материала FR4); h – толщина платы (длина отверстия), мм (предположим $h = 1,296$ мм); D_1 – диаметр контактной площадки, мм (предположим $D_1 = 0,22$ мм); D_2 – диаметр кругового зазора между металлизацией внутренних слоев и металлизированным отверстием, мм (предположим $D_2 = 0,27$ мм). [74]

$$C_{\text{отв}} = 0,055 \cdot 4,5 \cdot 1,296 \cdot \frac{0,22}{0,27 - 0,22} = 1,411 \text{ пФ},$$

Индуктивность металлизированного переходного отверстия вычисляется по формуле [47]:

$$L_{\text{отв}} = 0,2 \cdot h \cdot \left(\ln \frac{4h}{d} + 1 \right), \text{ нГн} \quad (\text{Б.2})$$

где d – диаметр сверления, мм (предположим $d = 0,12$ мм).

$$L_{\text{отв}} = 0,2 \cdot 1,296 \cdot \left(\ln \frac{4 \cdot 1,296}{0,12} + 1 \right) = 1,235 \text{ нГн}$$

2- При повороте трассы на 90° емкость поворота равна [47]:

$$C_{\text{пов}} = 1,65 \cdot \frac{w \sqrt{\epsilon_r}}{Z}, \text{ пФ} \quad (\text{Б.3})$$

где w – ширина проводника, мм; Z – волновое сопротивление линии передачи, Ом.

При $\epsilon_r = 4,5$; $w = 0,172$ мм и $Z = 50$ Ом емкость поворота будет $C_{\text{пов}} = 0,012$ пФ. Для данной работы предположены 8 поворота на линии передачи, поэтому общая емкостная неоднородность составит 0,096 пФ.

3- Емкостная нагрузка в конце линии (входная емкость микросхемы приемника сигнала):

По даташиту микросхемы ТХВ0108 [104], все её выходы имеют некоторую входную емкость, максимальное значение которой составляет примерно 10 пФ. Поэтому емкостная нагрузка выбирается:

$$C_{\text{вход}} = 10 \text{ пФ}$$

Перечисленные выше возможные неоднородности на линии передачи вызывают увеличение на конце линии длительности фронта ($\tau_{10/50}$) цифрового сигнала, это приводит к увеличению системной задержки (снижению системного быстродействия) [47]. Дополнительные задержки при наличии неоднородностей (Δt) определяются по формулам (Б.4 и Б.5).

Дополнительная задержка (Δt_C) за счет паразитной емкости неоднородности ($C_{\text{неодн}}$, пФ) на линии будет составлять [47]:

$$\Delta t_C = 0,5 \cdot Z \cdot C_{\text{неодн}}, \text{ пс} \quad (\text{Б.4})$$

Дополнительная задержка (Δt_L) за счет паразитной индуктивности неоднородности ($L_{\text{неодн}}$, нГн) на линии будет составлять [47]:

$$\Delta t_L = 0,5 \cdot \frac{L_{\text{неодн}}}{Z}, \text{ нс} \quad (\text{Б.5})$$

На рисунке Б.5 иллюстрированы эпюры, поясняющие работу схемы без учета паразитных неоднородностей и задержки сигналов.

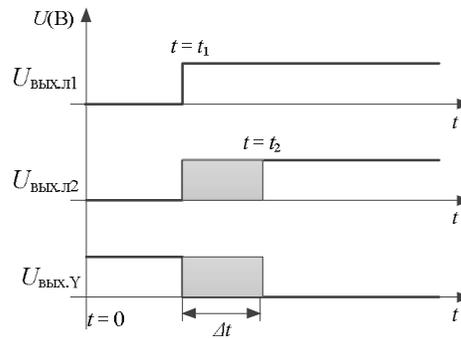


Рисунок Б.5 - Иллюстрированные эпюры, поясняющие работу схемы без учета паразитных неоднородностей и задержки сигналов

По эпюрам показано, что время (t_2) распределения цифрового сигнала с выхода $X1$ через $X2$ до входа Y больше времени (t_1) с выхода $X1$ прямо до входа Y , т.е. имеется расфазировка. В интервале $\Delta t = t_2 - t_1$ может рассматриваться как помеха [47]. Для устранения этого явления в [47] предполагается корректировка топологии, т.е. проводится компенсация задержек изменением длины печатных проводников.

По обоснованию в приложении А для выбора параметров линии передачи, предположим, что диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 4,5$, толщины меди $t = 0,035$ мм, толщины диэлектрики $h_{ms} = 0,105$ мм, ширины проводника $w = 0,172$ мм. При этом значение волнового сопротивления линии передачи $Z = 50$ Ом.

Проведён расчет дополнительных задержек для линий передачи: с выхода $X1$ прямо до разъема J (обозначим: $X1 - J$), с выхода $X1$ через $X2$ до разъема J (обозначим: $X1 - X2 - J$) с учетом неоднородностей (формулы Б.1-Б.5). При этом варьировано значение волнового сопротивления с погрешностью до 20%. Результаты расчета приведены в таблице Б.1.

Таблица Б.1 – Результаты расчета задержки линии передачи

Волновое сопротивление	$Z = 50$ Ом		$Z = 52,5$ Ом		$Z = 55$ Ом		$Z = 57,5$ Ом		$Z = 60$ Ом	
	$X1 - J$	$X1 - X2 - J$	$X1 - J$	$X1 - X2 - J$	$X1 - J$	$X1 - X2 - J$	$X1 - J$	$X1 - X2 - J$	$X1 - J$	$X1 - X2 - J$
Доп. задержка при наличии отверстий, $\Delta t_{отв} = \Delta t_{L,отв} + \Delta t_{C,отв}$, пс	-	190,5	-	195,2	-	200,1	-	205,2	-	210,5
Доп. задержка при наличии поворотов, $\Delta t_{пов}$, пс	-	2,4	-	2,52	-	2,64	-	2,76	-	2,88

Волновое сопротивление	Z = 50 Ом		Z = 52,5 Ом		Z = 55 Ом		Z = 57,5 Ом		Z = 60 Ом	
Линия передачи	X1 - J	X1 - X2-J	X1 - J	X1 - X2-J	X1 - J	X1 - X2-J	X1 - J	X1 - X2-J	X1 - J	X1 - X2-J
Доп. задержка при наличии емкости на конце линии, $\Delta t_{\text{емк}}$, пс	-	250,0	-	262,5	-	275,0	-	287,5	-	300,0
Суммарная доп. задержка линии $\Delta t_{\text{сум}} = \Delta t_{\text{отв}} + \Delta t_{\text{пов}} + \Delta t_{\text{емк}}$, пс	0	442,9	0	460,22	0	477,74	0	495,46	0	513,38

По таблице Б.1 видно, что при наличии неоднородности будут добавлены дополнительные задержки передаваемого цифрового сигнала (увеличивается длительность фронта импульса), при $Z = 50$ Ом суммарная дополнительная задержка составляет 442,9 пс. Поэтому снижается быстродействие цифрового устройства, увеличивается вероятность отказов и сбоев работы устройства. Дополнительная задержка из-за наличия поворотов (2,4 пс) на 90° много значительно меньше, чем при наличии отверстий (190,5 пс) и особенно паразитных емкостей на входах микросхем (250,0 пс). При погрешности значения волнового сопротивления до 20%, суммарная дополнительная задержка увеличивается до 16%. Она может оказать существенное влияние на работу схемы. Таким образом, при проектировании ПП для быстродействующих цифровых устройств необходимо контролировать погрешности ВС печатных проводников.

ПРИЛОЖЕНИЕ В. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТИ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ НА ПОГРЕШНОСТЬ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Цель исследования: Анализ влияния погрешности конструктивно-технологических параметров линии передачи на погрешность волнового сопротивления.

Условия задачи:

Рассмотрим сигнальный печатный проводник на внешнем слое (микростриповая линия) (рисунок В.1) МПП. Выбираем конструктивно-технологические параметры микростриповой линии передачи для классов точности (таблица В.1) (См. Приложение А).

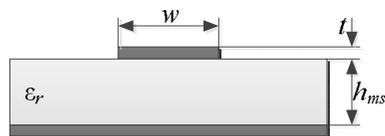


Рисунок В.1 - Микростриповая линия

Таблица В.1 - Параметры микростриповой линии передачи для класса точности

Параметры микростриповой линии для класса точности при $Z_0=50$ Ом ($\pm 10\%$) ($\epsilon_r = 4,5$; $t = 0,035$ мм)		
Класс Точности	Ширины проводн., w (мм)	Толщина диэлектрики, h_{ms} , (мм)
4	0,172038	0,105
5	0,101967	0,066
6	0,082541	0,055
7	0,073791	0,05

Уравнение относительной погрешности для волнового сопротивления в данном случае будет:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = A_w \frac{\Delta w}{w} + A_h \frac{\Delta h_{ms}}{h_{ms}} + A_t \frac{\Delta t}{t} + A_{\varepsilon_r} \frac{\Delta \varepsilon_r}{\varepsilon_r}, \quad (\text{B.1})$$

где w – ширина печатного проводника, мм; ε_r – диэлектрическая проницаемость; t – толщина меди (проводника), мм, h_{ms} – толщина диэлектрики, мм; A_w , A_{ε_r} , A_b , A_{hms} – значения коэффициентов влияния соответственно параметров на волновое сопротивление; Δw , $\Delta \varepsilon_r$, Δt , Δh_{ms} – погрешности соответственно параметров от их номинальных значений.

Решение:

По полученным в главе 2 выражениям (формулы 2.19-2.30) и выбранным данным параметров рассчитывается значение коэффициентов влияния параметров на значение волнового сопротивления линии передачи (таблице В.2).

Таблица В.2 – Коэффициенты влияния параметров на волновое сопротивление

Класс точности	Значение коэффициента влияния параметров			
	A_w	A_{hms}	A_t	A_{ε_r}
4	-0,52	0,79	-0,00475	-0,439
5	-0,502	0,78	-0,00331	-0,43
6	-0,496	0,76	-0,00186	-0,424
7	-0,494	0,74	-0,00779	-0,42

По таблице В.2 показано, что значения коэффициента влияния для толщины проводника (A_t) очень малы, поэтому можно пренебречь влиянием этого параметра на значение волнового сопротивления.

Рассмотрим влияние значения диэлектрической проницаемости (ε_r).

В работе [2] написано, что ожидаемое отклонение величины ε_r лежит в диапазоне $\pm 0,2$. Проведен перерасчет значения волнового сопротивления при варьировании значения ε_r в диапазоне $\pm 0,2$ для класса точности 7. Результаты расчета приведены в таблице В.3 и на рисунке В.2.

Таблица В.3 – Результаты расчета волнового сопротивления при погрешности диэлектрической проницаемости для класса точности 7

Диэлектр. проницаемость, ϵ_r	Волновое сопротивление, Z (Ом)	Отн. погр. проницаемость, $\Delta\epsilon_r /$ ϵ_r (%)	Отн. погр. волн. сопротивления, $\Delta Z/Z$ (%)
4.3	50.95	-4.44	1.90
4.35	50.71	-3.33	1.42
4.4	50.47	-2.22	0.94
4.45	50.23	-1.11	0.47
4.5	50.00	0.00	0.00
4.55	49.77	1.11	-0.46
4.6	49.54	2.22	-0.91
4.65	49.32	3.33	-1.36
4.7	49.10	4.44	-1.80

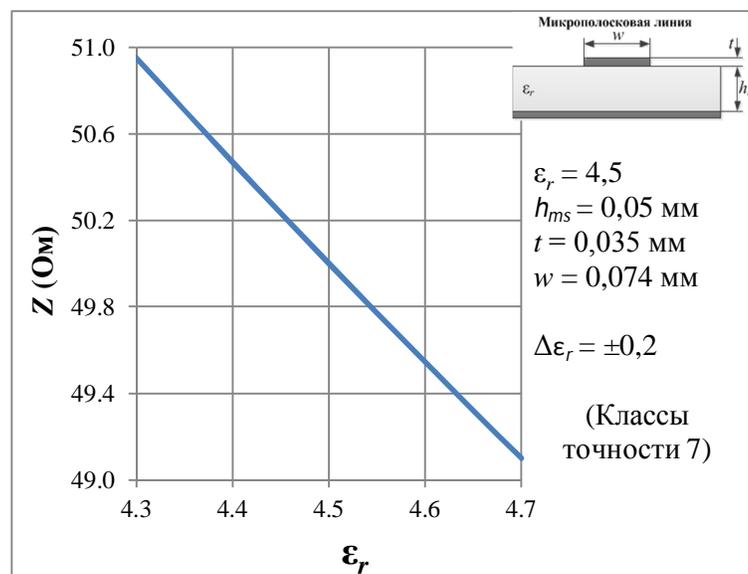


Рисунок В.2 – Зависимость волнового сопротивления (Z) от диэлектрической проницаемости (ϵ_r)

По результатам показано, что максимальная погрешность (ϵ_r) дает максимальную погрешность волнового сопротивления не более 2%.

Рассмотрим влияние значения толщины диэлектрики (препрега) (h_{ms}).

По [2] при прессовании отклонение толщины препрега достигает -10 мкм. Проведен перерасчет значения волнового сопротивления при варьировании

значения h_{ms} в диапазоне -10...0 мкм для класса точности 7. Результаты расчета приведены в таблице В.4 и на рисунке В.3.

Таблица В.4 – Результаты расчета волнового сопротивления при погрешности толщины h_{ms} для класса точности 7

Толщина диэлектрики, h_{ms} (мм)	Волновое сопротивление, Z (Ом)	Отн. погр. проницаемость, $\Delta h_{ms} / h_{ms}$ (%)	Отн. погр. волн. сопротивления, $\Delta Z/Z$ (%)
0.04	44.00	-20.00	-12.00
0.042	45.28	-16.00	-9.45
0.044	46.51	-12.00	-6.97
0.046	47.71	-8.00	-4.58
0.048	48.87	-4.00	-2.26
0.05	50.00	0.00	0.00

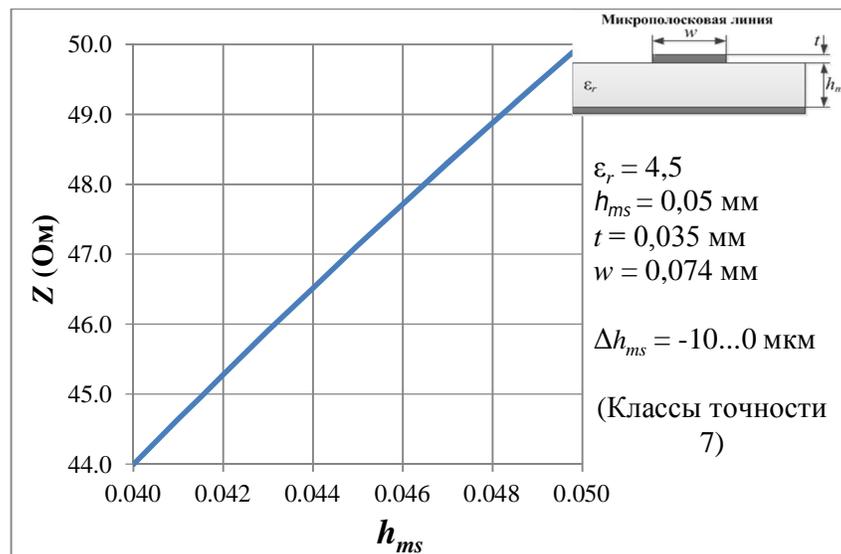


Рисунок В.3 – Зависимость волнового сопротивления (Z) от толщины (h_{ms})

По результатам показано, максимальная погрешность (h_{ms}) дает максимальную погрешность волнового сопротивления 12%.

Рассмотрим зависимость значения волнового сопротивления от погрешности ширины проводника для класса точности 7. В ГОСТ 53429-2009 [19] приведено предельное отклонение ширины печатного проводника для класса

точности. Для класса точности 7 это значение лежит в диапазоне (-0,015...+0) мм.

Результаты расчета приведены в таблице В.5 и на рисунке В.4.

Таблица В.5 – Результаты расчета волнового сопротивления при погрешности ширины проводника для класса точности 7

Ширины проводн., w (мм)	Волновое сопротивление, Z (Ом)	Отн. погр. ширины, $\Delta w/w$ (%)	Отн. погр. волн. сопротивления, $\Delta Z/Z$ (%)
0.058791	55.34	-20.33	10.68
0.059791	54.94	-18.97	9.89
0.060791	54.55	-17.62	9.11
0.061791	54.17	-16.26	8.34
0.062791	53.79	-14.91	7.59
0.063791	53.42	-13.55	6.85
0.064791	53.06	-12.20	6.12
0.065791	52.70	-10.84	5.40
0.066791	52.34	-9.49	4.69
0.067791	51.99	-8.13	3.99
0.068791	51.65	-6.78	3.30
0.069791	51.31	-5.42	2.62
0.070791	50.98	-4.07	1.95
0.071791	50.65	-2.71	1.29
0.072791	50.32	-1.36	0.64
0.073791	50	0	0

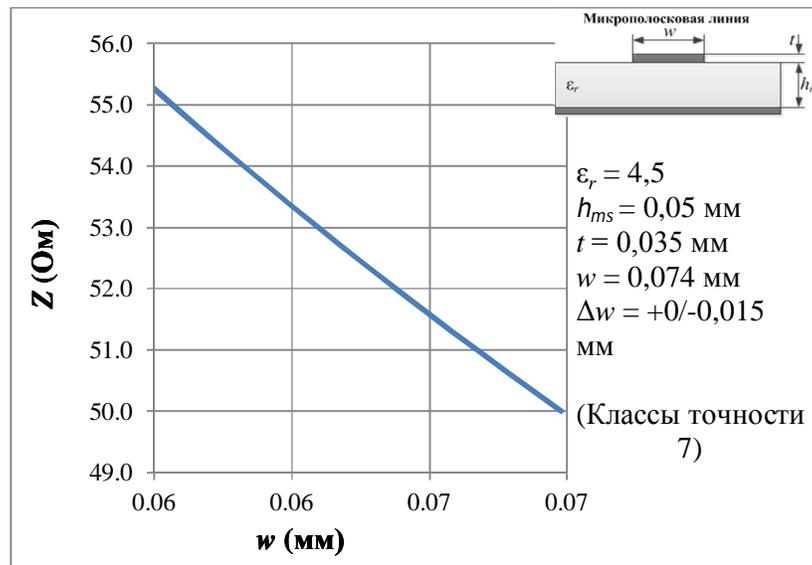


Рисунок В.4 – Зависимость волнового сопротивления (Z) от ширины проводника (w)

На рисунке В.4 показано, что для класса точности 7, при погрешности ширины проводника в диапазоне $(-0,015...+0)$ мм изменяется значение волнового сопротивления проводника в диапазоне $Z = 50 \div 55,34$ Ом, максимальная относительная погрешность от номинального значения волнового сопротивления (50 Ом) составляет примерно 10,7%.

Вывод: Проведенное исследование показывает, что на погрешность волнового сопротивление печатных проводников значительное влияние оказывает погрешность параметров (ширины проводника, толщины и электрической проницаемости диэлектрики). Отклонение значения ширины проводника формируется при травлении слоев металлизации. В результате операции травления погрешность ширины проводника появляется из-за подтравки. При этом уход значения волнового сопротивления может превысить 10%.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БРАКА ПРИ УСТАНОВКЕ КОМПОНЕНТОВ НА ПЕЧАТНУЮ ПЛАТУ

Цель исследования: Расчет вероятности брака при установке компонентов на печатную плату с использованием разработанной методики прогнозирования дефектов сборки.

Условия работы:

Рассмотрим плату для обработки цифровых сигналов на основе микросхемы FPGA XC3S500E-4PQG208C (рисунок Г.1). В таблице Г.1 приведены параметры платы.

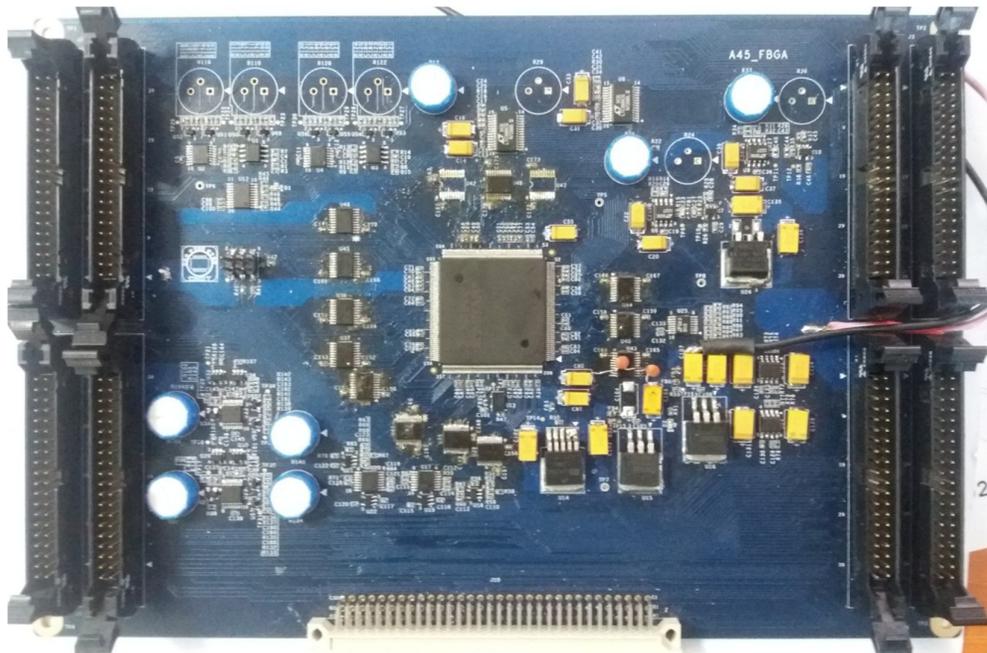


Рисунок Г.1 - Плата для обработки цифровых сигналов на основе
микросхемы FPGA XC3S500E-4PQG208C

Таблица Г.1 – Параметры платы для обработки цифровых сигналов на основе микросхемы FPGA XC3S500E-4PQG208C

Микросхема	Количество	ГОСТ
Встраиваемый программируемый логический ИС (ПЛИС) XC3S500E-4PQG208C	1	P-QFP-0208- 2828-0,50
Преобразователь логического уровня TXB0108PWR	14	P-SSOP20- 4,4x6,5-0,65
Аналоговый переключатель ADG1436YRUZ	6	P-SSOP16-

Микросхема	Количество	ГОСТ
		4,4x5,0-0,65
Схема мониторинга напряжения, активный высокий, выход сброса с активным низким, 8 мониторов, 2В-7В LTC2910CGN PBF	1	P-SSOP16- 4,4x5,0-0,65

В стандарте IEC 61188-5-5-2013 [18] для каждого типа корпусов определены допустимые параметры посадочных мест. Каждое посадочное место варьирует размеры в зависимости от выбранной плотности монтажа. На рисунке Г.2 приведен корпус с четырехсторонним расположением выводов (P-QFP-0208-2828-0,50). Посадочное место для этого корпуса показано на рисунке Г.3. Размеры корпуса и посадочного места приведены в таблицах Г.2 и Г.3.

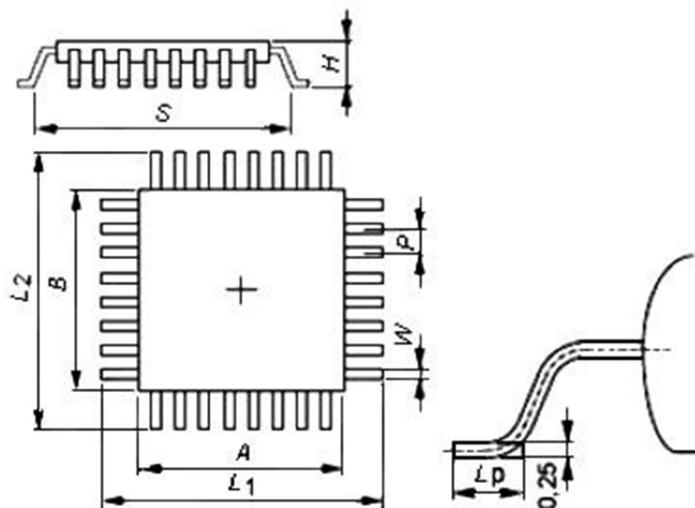


Рисунок Г.2 - Размеры корпуса типа P-QFP [18]

Таблица Г.2 - Размер корпуса P-QFP [18]

В миллиметрах

Код корпуса по EIAJ	Код корпуса по JEDEC	L_2		L_1		L_p		W			S^*		B	A	P	H
		min	max	min	max	min	max	min	nom	max	min	max				
P-QFP-0208-2828-0,50	P-QFP/208-28x28-0,50	30,35	30,85	30,35	30,85	0,45	0,75	0,17	0,20	0,23	28,85	29,51	28,0	28,0	0,50	3,85

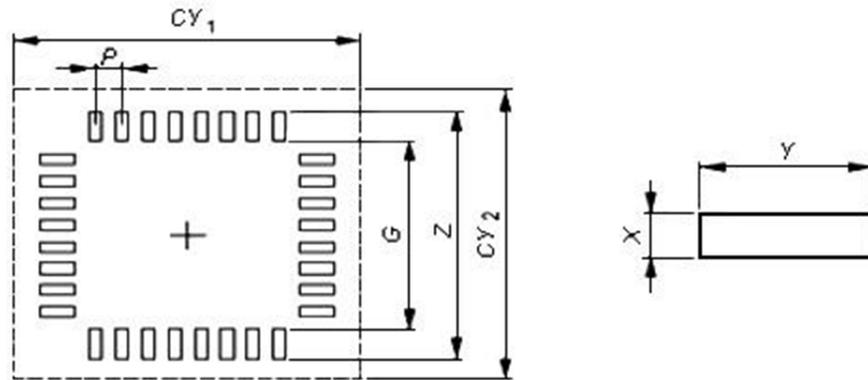


Рисунок Г.3 - Размеры посадочного места корпуса P-QFP [18]

Таблица Г.3 - Размеры посадочного места корпуса P-QFP [18]

В миллиметрах

Иден-р пос. Места	Код корпуса по EIAJ	Код корпуса по JEDEC	Z	G	X*	Y	P	CY ₁	CY ₂
5029M	P-QFP-0208-2828- 0,50	P-QFP/208-28x28- 0,50	Уровень 1						
			32,0	28,4	0,33	1,8	0,50	33	33
5029N			Уровень 2						
			31,6	28,4	0,33	1,6	0,50	32,1	32,1
5029L			Уровень 3						
			31,15	28,45	0,25	1,35	0,50	31,4	31,4

На рисунке Г.4 приведен корпус типа PSSOP [17]. Посадочное место для этого корпуса показано на рисунке Г.5. Размеры корпуса и посадочного места приведены в таблицах Г.4 и Г.5.

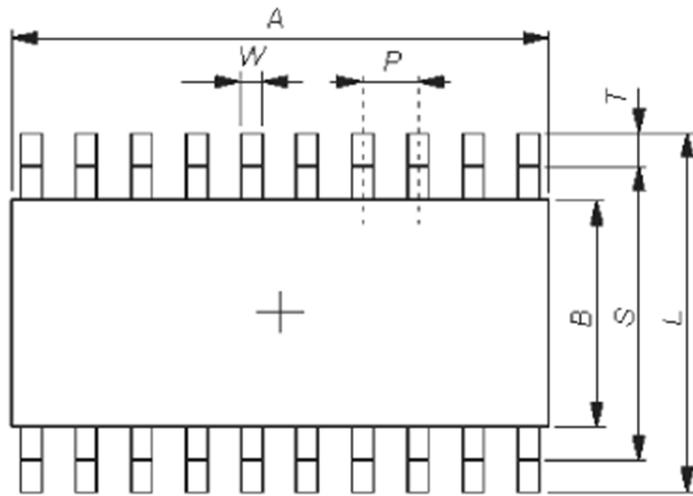


Рисунок Г.4 - Размеры корпуса типа PSSOP [17]

Таблица Г.4 - Размер корпуса PSSOP [17]

В миллиметрах

Идентиф. корпуса	Число выводов	L		W		T		S*		A		B		H	P
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	max	Basis
P-SSOP16-4,4x5,0-0,65	16	6,20	6,60	0,16	0,28	0,45	0,75	4,7	5,28	4,80	5,20	4,20	4,60	1,20	0,65
P-SSOP20-4,4x6,5-0,65	20	6,20	6,60	0,16	0,28	0,45	0,75	4,7	5,28	6,30	6,70	4,20	4,60	1,45	0,65

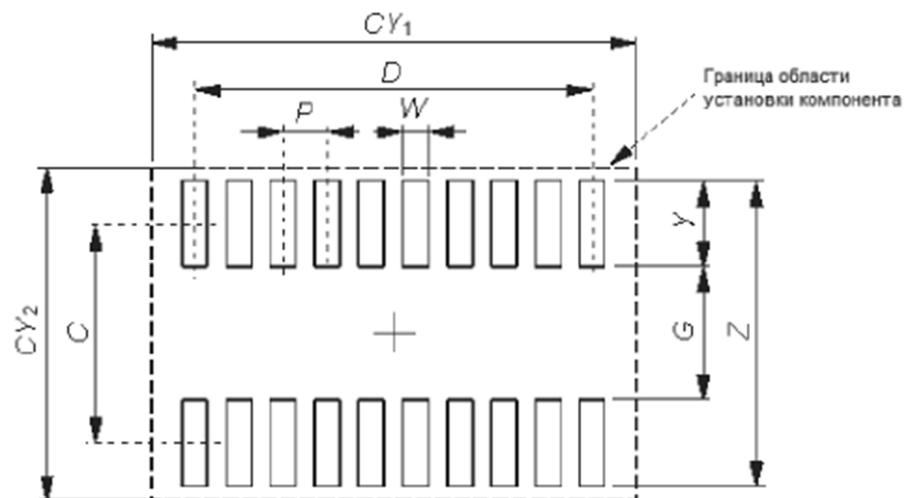


Рисунок Г.5 - Размеры посадочного места корпуса PSSOP [17]

Таблица Г.5 - Размеры посадочного места корпуса PSSOP [17]

В миллиметрах

Иден-р пос. места	Идентиф. корпуса	Z	G	X	Y	C	D	P	CY ₁	CY ₂	
3043M	P-SSOP16-4,4x5,0-0,65	Уровень 1									
		8,3	4,4	0,35	1,95	6,35	4,55	0,65	7	10	
3043N		Уровень 2									
		7,7	4,4	0,35	1,65	6,05	4,55	0,65	6	9	
3043L		Уровень 3									
		7,00	4,4	0,3	1,30	5,70	4,55	0,65	5,5	7,2	
3044M	P-SSOP20-4,4x6,5-0,65	Уровень 1									
		8,3	4,4	0,35	1,95	6,35	5,85	0,65	8	10	
3044N		Уровень 2									
		7,7	4,4	0,35	1,65	6,05	5,85	0,65	8	9	
3044L		Уровень 3									
		7,00	4,4	0,3	1,30	5,70	5,85	0,65	7,0	7,2	

В работах [51] приведены факторы влияния на точность позиционирования компонентов на плату. По данным источников при применении различного оборудования сложение этих факторов может привести к суммарной погрешности (d_{Σ}) позиционирования в пределах 0,036... 0,251 мм. Относительные погрешности δ определяется по формуле $\delta = d_{\Sigma}/W$.

Решение:**Определение допусков относительной погрешности**

Для корпуса P-QFP-0208-2828-0,50, предположим, $d_{\Sigma} = 0,110$ мм. Тогда $\delta = 0,110/0,23 = 0,478$. Результат расчета приведен в таблице Г.6.

Таблица Г.6 – Результат расчета для корпуса P-QFP-0208-2828-0,50

		Класс А	Класс В	Класс С
Уровень 1	<i>Wз, мм</i>	0.483333	0.483333	0.445
	<i>Delx</i>	0.550725	0.550725	0.467391
	<i>Dely+</i>	2.565217	2.065217	2.065217
	<i>Dely-</i>	2.065217		
	<i>Del</i>	0.550725	0.550725	0.467391

		Класс А	Класс В	Класс С
Уровень 2	<i>Wз, мм</i>	0.483333	0.483333	0.445
	<i>Delx</i>	0.550725	0.550725	0.467391
	<i>Dely+</i>	2.130435	1.630435	1.630435
	<i>Dely-</i>	1.630435		
	<i>Del</i>	0.550725	0.550725	0.467391
Уровень 3	<i>Wз, мм</i>	0.403333	0.403333	0.365
	<i>Delx</i>	0.376812	0.376812	0.293478
	<i>Dely+</i>	1.586957	1.086957	1.086957
	<i>Dely-</i>	1.086957		
	<i>Del</i>	0.376812	0.376812	0.293478

Вероятность предельного отклонения положения вывода рассчитывается по формуле (4.37) в главе 4. При этом дисперсия отклонения $\sigma = \frac{\delta}{3} = \frac{0,478}{3} = 0,159$.

Результат расчета вероятности отклонения положения вывода корпуса P-QFP-0208-2828-0,50 от допустимых значений для ПП различных классов аппаратуры при варьировании уровня плотности монтажа приведен в таблице Г.7. Таблица Г.7 - Результат расчета вероятности отклонения положения вывода корпуса P-QFP-0208-2828-0,50

	Вероятность отклонения положения вывода		
	Класс А	Класс В	Класс С
Уровень 1	0,058%	0,058%	0,35%
Уровень 2	0,058%	0,058%	0,35%
Уровень 3	1,9%	1,9%	6,7%

Для P-SSOP20-4,4x6,5-0,65 (P-SSOP16-4,4x5,0-0,65), предположим, $d_{\Sigma} = 0,110$ мм. Тогда $\delta = 0,110/0,28 = 0,393$. При этом СКО относительной погрешности $\sigma = \frac{\delta}{3} = \frac{0,393}{3} = 0,131$. Результат расчета приведен в таблице Г.8.

Таблица Г.8 – Результат расчета для корпуса P-SSOP20-4,4x6,5-0,65 (P-SSOP16-4,4x5,0-0,65)

		Класс А	Класс В	Класс С
Уровень 1	<i>Wз, мм</i>	0.63	0.63	0.49
	<i>Delx</i>	0.625	0.625	0.375
	<i>Dely+</i>	2.642857	2.142857	2.142857
	<i>Dely-</i>	2.142857		
	<i>Del</i>	0.625	0.625	0.375
Уровень 2	<i>Wз, мм</i>	0.63	0.63	0.49
	<i>Delx</i>	0.625	0.625	0.375
	<i>Dely+</i>	2.107143	1.607143	1.607143
	<i>Dely-</i>	1.607143		
	<i>Del</i>	0.625	0.625	0.375
Уровень 3	<i>Wз, мм</i>	0.58	0.58	0.44
	<i>Delx</i>	0.535714	0.535714	0.285714
	<i>Dely+</i>	1.482143	0.982143	0.982143
	<i>Dely-</i>	0.982143		
	<i>Del</i>	0.535714	0.535714	0.285714

Результат расчета вероятности отклонения положения вывода корпуса P-SSOP20-4,4x6,5-0,65 (P-SSOP16-4,4x5,0-0,65) от допустимых значений для ПП различных классов аппаратуры при варьировании уровня плотности монтажа приведен в таблице Г.9.

Таблица Г.9 - Результат расчета вероятности отклонения положения вывода корпуса P-SSOP20-4,4x6,5-0,65 (P-SSOP16-4,4x5,0-0,65)

	Вероятность отклонения положения вывода		
	Класс А	Класс В	Класс С
Уровень 1	0,0002%	0,0002%	0,42%
Уровень 2	0,0002%	0,0002%	0,42%
Уровень 3	0,004%	0,004%	2,9%

Зная вероятность нарушения допусков установки одного компонента P_i , можно рассчитать вероятность нарушения допусков при установке всех компонентов схемы (формула 4.38 в главе 4).

Результат расчета вероятности нарушения допусков при установке всех компонентов схемы приведен в таблице Г.10.

Таблица Г.10 - Результат расчета вероятности нарушения допусков при установке всех компонентов схемы

	Вероятность нарушения допусков		
	Класс А	Класс В	Класс С
Уровень 1	0,062%	0,062%	8,8%
Уровень 2	0,062%	0,062%	8,8%
Уровень 3	2%	2%	49,7%

Вывод:

При выбранной технологии сборки надежность паяных соединений резко снижается. Следовательно, необходимо либо применять более точное сборочное производство, либо пожертвовать конструктивно-технологическими показателями для повышения надежности и перейти к низким уровням плотности. Для аппаратуры класса С оцениваемая в примере технология сборки скорее всего вообще неприемлема.