

На правах рукописи

НИСАН АНТОН ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПАР В
ПЕЧАТНЫХ УЗЛАХ УСТРОЙСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Специальность 05.12.13 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре “Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы” Московского государственного института электроники и математики.

Научный руководитель - д.т.н., профессор Кечиев Леонид Николаевич

Официальные оппоненты:

Ведущее предприятие _____

Защита состоится “__” июня 2009 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.133.06 Московского государственного института электроники и математики по адресу:
109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан “__” мая 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к. т. н., профессор

Н. Н. Грачев

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Телекоммуникации – одна из наиболее динамично развивающихся и приоритетных отраслей. Современный этап развития телекоммуникационной аппаратуры характеризуется постоянным ростом быстродействия, повышением сложности устройств, миниатюризацией. 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. Стремительное развитие систем и устройств телекоммуникаций во многом обусловлено ускоряющимся ростом объема информации, которую необходимо передавать. Причем эта тенденция будет сохраняться и, согласно прогнозу компании Nokia Siemens Networks, с 2010 по 2015 год объем трафика в фиксированных сетях увеличится в сто раз. Большими темпами идет прирост абонентов сотовых систем: если в начале 2008 года в мире насчитывалось 3 миллиарда пользователей, то согласно прогнозам, к концу 2012 года число пользователей вырастет практически до 5 миллиардов. Повышение быстродействия выводит на ведущие позиции проблемы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) и целостности сигнала (ЦС).

Суммарный годовой доход компаний телекоммуникационной отрасли мира в 2008 году составил 3,85 триллиона долларов (см. также Рис. 1). Успех компаний на этом многомиллиардном рынке во многом связан со временем вывода нового изделия на рынок. В таких условиях чтобы угнаться за конкурентами требуется максимально сокращать сроки разработки и доводки устройств, в том числе печатных узлов.

Таким образом, две современные тенденции – повышение быстродействия и сокращение срока разработки – выводят проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) и целостности сигнала (ЦС) на новый уровень.

В России проблеме проектирования быстродействующих устройств и систем с учетом требований ЭМС и ЦС посвящены работы Балюка Н.В., Газизова Т.Р., Кечиева Л. Н., Князева А. Д., Костроминова А.М., Петрова Б. В., Файзулаева Б. Н., Чермошенцева С.Ф. и др. Из исследований в этой области за рубежом можно выделить работы Дж. Барнса, Э. Богатина, Д. Брука, Д. Отта, Т. Уильямса, Д. Уайта, Э. Хабигера, А. Шваба.

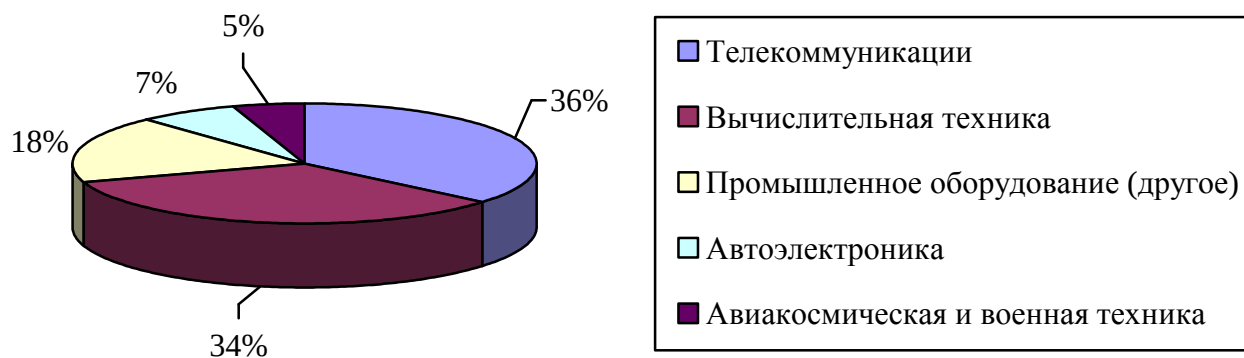


Рис. 1. Распределения рынка печатных плат Северной Америки по доходам

Анализ состояния проблемы показал, что для повышения качества обработки информации при высоком быстродействии в условиях помех развиваются новые подходы к созданию устройств телекоммуникаций на основе низковольтной передачи сигналов (LVDS). Проектирования дифференциальных пар LVDS в устройствах телекоммуникаций позволяет прийти к выводу, что преимущества дифференциальной передачи сигнала раскрываются в полном объеме только при правильном проектировании и качественном изготовлении электронных модулей с дифференциальными парами. Несмотря на то, что проектирование печатных плат с дифференциальными парами ведется с середины 90-х гг., существующие методики проектирования не всегда оказываются эффективными. Во многом это связано с тем, что для обеспечения целостности сигнала на стадии проектирования требуется анализ влияния большого числа конструкторско-технологических параметров. Принципиально это возможно, но требует использования специального программного обеспечения, подготовки специалистов, и практически не используется предприятиями, разрабатывающие быстродействующие устройства телекоммуникаций. Также недостаточное развитие теории моделирования дифференциальных пар не позволяет сформулировать научно-обоснованные рекомендации по их проектированию.

Цель работы

На основании проведенного анализа можно сформулировать цели и задачи диссертационной работы. Цель данной работы заключается в повышении эффективности проектирования дифференциальных пар в устройствах телекоммуникаций за счет разработки и внедрения научно-обоснованной методики проектирования, более полно учитывающей влияние конструкторско-технологических параметров пар.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

1. Анализ проблемы целостности сигнала в дифференциальной паре.
2. Анализ методов расчета параметров дифференциальной пары.
3. Разработка уточненной модели дифференциальной пары.
4. Разработка методики проектирования дифференциальных пар, учитывающей влияние конструкторско-технологических параметров пары на ее дифференциальное полное сопротивление.
5. Разработка программного обеспечения, позволяющего оптимизировать параметры дифференциальной пары под требуемое дифференциальное полное сопротивление.
6. Внедрение разработанной методики и программного обеспечения в практику промышленного проектирования и в учебный процесс вуза.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовались принципы системного подхода, методы теории планирования эксперимента, методы оптимизации, теория цепей и электромагнитного поля.

На защиту выносятся:

1. Модель микрополосковой дифференциальной пары.
2. Методика проектирования дифференциальных пар.
3. Рекомендации по проектированию.

Научная новизна

Научная новизна заключается в разработке методики проектирования дифференциальных пар, отличительной особенностью которой является более полный и точный учет влияния на дифференциальное полное сопротивление существенных конструкторско-технологических параметров.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- получена модель микрополосковой дифференциальной пары, учитывающая зависимость дифференциального полного сопротивления от 13 значимых конструкторских и технологических параметров;
- разработана программа «Оптимизатор параметров микрополосковой дифференциальной пары», что позволяет комплексно оценить влияние параметров, и подобрать значения параметров пары под требуемое дифференциальное сопротивление.

Полученные результаты внедрены в практику промышленного проектирования и в учебный процесс вуза.

Достоверность и обоснованность результатов, представленных в диссертации, подтверждается адекватностью математических моделей; сравнением полученных результатов с известными из литературных источников; результатами внедрения разработанных методов и рекомендаций в практику.

На разработанную программу «Оптимизатор параметров микрополосковой дифференциальной пары» получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008612070, выданное Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

Реализация результатов и предложения об использовании

Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в практику проектирования печатных узлов в ФГУП МОКБ "Марс", а также в учебный процесс ГОУВПО МИЭМ.

Полученные в диссертационной работе результаты рекомендуется использовать при комплексном проектировании перспективных устройств телекоммуникаций, в которых используются схемы низковольтных дифференциальных сигналов (LVDS), и вычислительных сетей на их основе.

Апробация работы

Результаты представлялись и докладывались на Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ, Москва, в 2007, 2008, 2009 гг., Научно-практической конференции «Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий», Сочи, 2007 г., на VII международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, Санкт-Петербург, в 2007 г., на Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости ЭМС-2008, Санкт-Петербург.

Связь темы с планами основных научных работ

Исследования и практическая реализация результатов диссертационной работы проводилась в Московском Государственном институте электроники и математики на кафедре "Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы" по темам:

- «Исследование мощных электромагнитных колебаний СВЧ диапазона и сверхширокополосных импульсных полей большой энергии при взаимодействии с техническими средствами»;
- «Создание научных основ обеспечения стойкости радиоэлектронных средств наземного и бортового базирования к деструктивным ионизирующим и электромагнитным воздействиям»;
- «Теория и практика обеспечения стойкости технических средств бортового базирования к деструктивным электромагнитным воздействиям».

Публикации

По теме диссертации подготовлено 15 публикаций, в том числе 2 в журналах, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. В приложении приведены акты внедрения и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, определена направленность ее результатов и рассмотрено логическое построение работы по главам.

В **первой** главе рассматривается современное состояние проблемы проектирования быстродействующих устройств телекоммуникаций. Показано развитие устройств телекоммуникаций, проанализированы тенденции в печатных платах и компонентах. Рассмотрено развитие систем передаче сигнала, вскрыты преимущества и недостатки дифференциальной передачи сигнала, проанализирована одна из наиболее распространенных сигнальных схем – схема низковольтных дифференциальных сигналов, см. Рис. 2. Выполнен анализ возможностей САПР печатных плат в части проектирования дифференциальных пар.

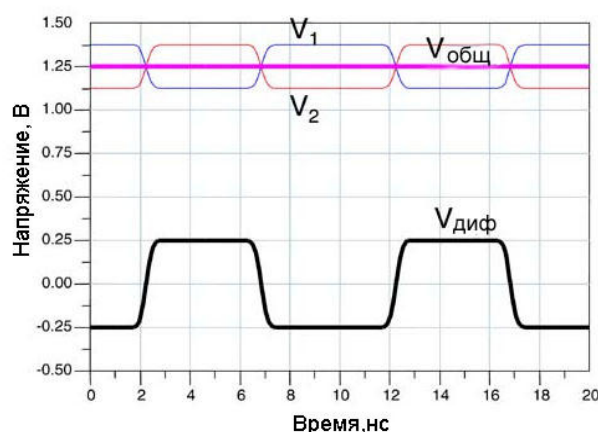


Рис. 2. Схема низковольтных сигналов

Хотя алгоритмы трассировки непрерывно совершенствуются, для многих САПР топологические задачи оторваны от задач анализа прохождения сигнала по линиям передачи в составе платы и оценки качества функционирования печатного узла. Даже, если подобные процедуры включены в состав наиболее продвинутых САПР, алгоритмы и суть выполняемых задач, как правило, скрыты от пользователя, что не позволяет судить о качестве решаемых задач, развивать их и творчески применять для новых изделий с более высокими параметрами быстродействия.

Эффективность САПР можно оценить по двум параметрам: числу итераций при проектировании печатных плат и временным затратам на проектирование плат (т.е. временем от готового технического задания до изготовления прототипа платы), см. Рис. 3, Рис. 4. Из графиков видно, что в среднем при проектировании 20% плат производится от пяти до девяти итераций, а время от технического задания до изготовления прототипа платы примерно в 40% случаев составляет 4-6 и более месяцев.

Эти данные свидетельствуют о недостаточной эффективности используемых методик и программных средств для проектирования печатных плат.

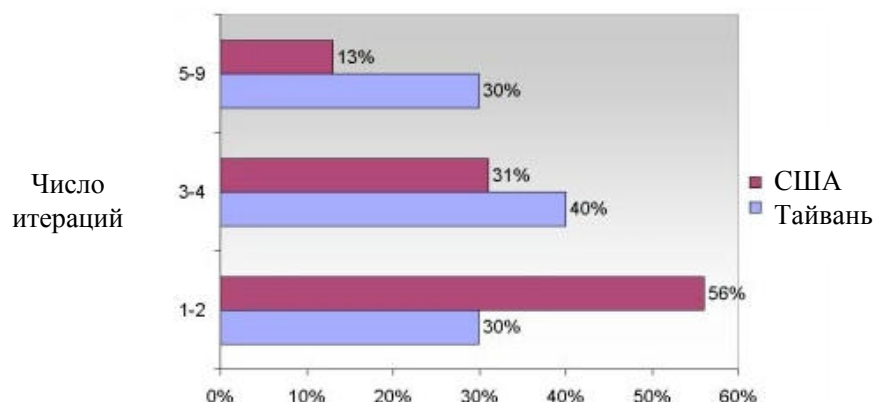


Рис. 3. Число итераций при проектировании печатных плат в США и на Тайване

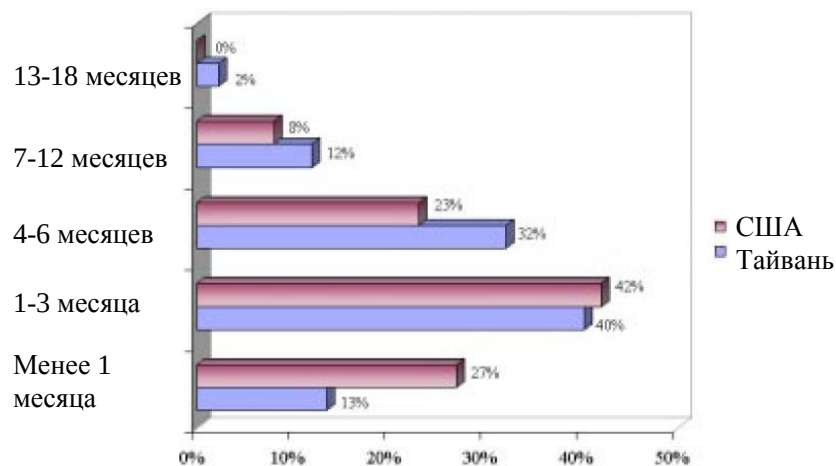


Рис. 4. Оценки времени от технического задания до прототипа платы при проектировании печатных плат в США и на Тайване [52]

В результате проведенного анализа сформулирована цель и задачи диссертационной работы.

Во **второй** главе развит модовый анализ передачи сигнала по дифференциальной паре. Под четной модой понимается такое состояние дифференциальной пары, когда напряжения на линиях одинаковы, под нечетной модой – когда оппозитны. Таким образом, дифференциальный сигнал соответствует возбуждению нечетной моды, а сигнал общего вида создает четную моду для симметричной, связанной микрополосковой дифференциальной пары.

В данной главе выполнен анализ зависимости разницы задержки распространения четной и нечетной мод от диэлектрических проницаемостей основания платы, паяльной маски и влагозащитного покрытия численными методами расчета поля в ELCUT. Параметры исследуемой пары приведены в Таблица 1, полученные результаты в виде графиков зависимости задержки распространения четной и нечетной мод от относительных диэлектрических проницаемостей указанных выше материалов приведены на Рис. 5–Рис. 7.

На приведенных графиках видно, что в рассматриваемых диапазонах зависимость задержек от диэлектрических проницаемостей линейна. Диэлектрическая проницаемость основания платы сильнее влияет на задержку четной моды, диэлектрические проницаемости паяльной маски и влагозащитного покрытий – на задержку нечетной.

Это объясняется характером распределения поля в режимах четной и нечетной моды. В режиме четной моды электрическое поле, в основном сосредоточено в основании платы, а за его пределами проходит не так много силовых линий. А в режиме нечетной моды через паяльную маску и влагозащитное покрытие проходит несколько больше силовых линий, поэтому эти покрытия оказывают более существенное влияние на задержку нечетной моды.

Таблица 1. Параметры исследуемой микрополосковой дифференциальной пары

Параметр	Значение
Ширина проводников, мкм	200
Зазор между проводниками, мкм	250
Толщина проводников, мкм	35
Толщина основания платы, мкм	250
Относительная диэлектрическая проницаемость основания платы	4
Толщина паяльной маски, мкм	35
Относительная диэлектрическая проницаемость паяльной маски	3,5
Толщина влагозащитного покрытия, мкм	70
Относительная диэлектрическая проницаемость влагозащитного покрытия	3,5

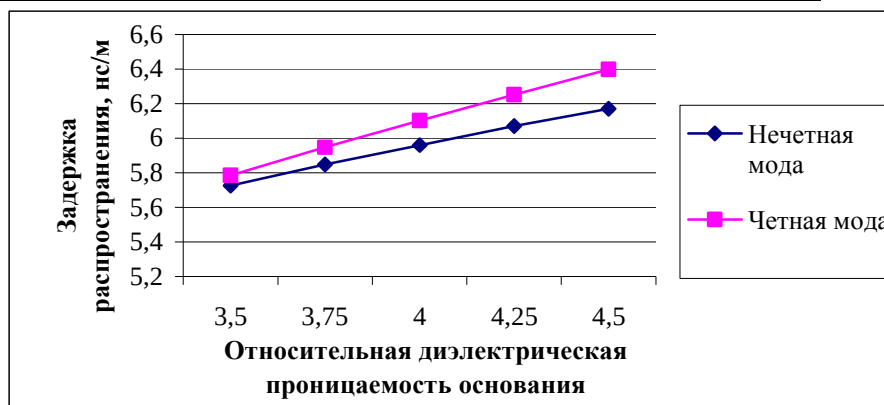


Рис. 5. Зависимость задержки распространения четной и нечетной мод от диэлектрической проницаемости основания платы

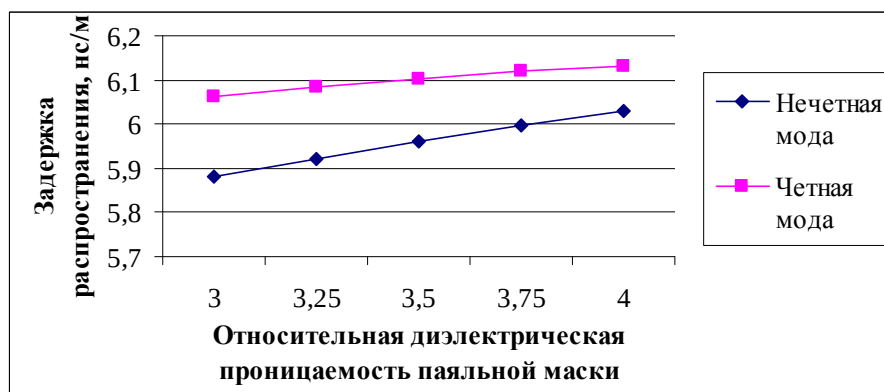


Рис. 6. Зависимость задержки распространения четной и нечетной мод от диэлектрической проницаемости паяльной маски

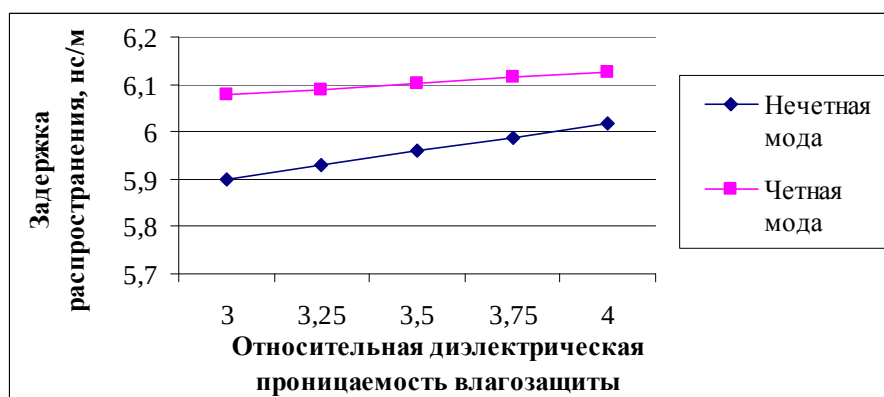


Рис. 7. Зависимость задержки распространения четной и нечетной мод от диэлектрической проницаемости паяльной маски

Разность задержки четной и нечетной мод пропорциональна диэлектрической проницаемости основания платы и обратно пропорциональна диэлектрическим проницаемостям паяльной маски и влагозащитного покрытия. При отсутствии паяльной маски и влагозащитного покрытия задержка распространения сигнала в режиме четной моды составляет 5,69 нс/м, в режиме нечетной моды – 5,16 нс/м, разность задержек 0,53 нс/м, что существенно больше, чем с покрытиями.

Помимо разбега мод, на целостность сигнала большое влияние оказывает рассогласование. Проблема рассогласования обостряется при использовании встроенных резисторов, часто имеющих недопустимо большой допуск на сопротивление. Проведенный анализ проблемы рассогласования из-за использования встроенных резисторов позволил сделать следующие выводы:

- для того, чтобы коэффициент отражения в худшем случае не превышал допустимый (0,05) допуска на согласующие резисторы и дифференциальное полное сопротивление пары должны быть $\pm 5\%$;
- при проектировании дифференциальных пар необходимо уточнить наличие встроенных в приемники резисторов. При их наличии необходимо уточнить номинальное значение, обращая внимание на то, что оно не всегда равно 100 Ом, а также допуск на сопротивление;
- если допуск на сопротивление встроенных резисторов больше $\pm 5\%$, то рекомендуется рассмотреть возможность применения аналогичных приемников дифференциального сигнала но с меньшим допуском на сопротивление или без встроенных резисторов (т.е. согласовать внешними чип-резисторами).

Оценка погрешности расчета дифференциального сопротивления различными методами была проведена на микрополосковой паре, так как на ее дифференциальное полное сопротивление влияет наибольшее число конструкторско-технологических факторов. В Таблица 2 приведены результаты расчета дифференциального полного сопротивления микрополосковой пары, а также микрополосковой пары, сечение которой показано на Рис. 8.



Рис. 8. Сечение исследуемой микрополосковой дифференциальной пары: 1, 2 – дифференциальная пара, 3 – одиночный проводник (микрополосковая пара II)

Таблица 2. Результаты расчета дифференциального полного сопротивления пары с параметрами $w=300$ мкм, $s=400$ мкм, $t=35$ мкм, $h=300$ мкм, $\varepsilon=4$

Метод расчета	Микрополосковая дифференциальная пара (микрополосковая пара I)		Микрополосковая дифференциальная пара, расположенная близко к краю платы, с паяльной маской и влагозащитным покрытием, проводником 3, щель в диэлектрике (микрополосковая пара II)		Средняя погрешность, %	Примечание
	Расчетное значение Z_{diff} , Ом	Погрешность относительно ELCUT, %	Расчетное значение Z_{diff} , Ом	Погрешность относительно ELCUT, %		
ELCUT	118,1	-	101,5	-	-	
IPC-2141A	141,2	19,6	141,2	39,1	29,4	Паяльная маска, влагозащитное покрытие, расстояние до края платы, близлежащий одиночный проводник, щель в диэлектрике не учитываются
IPC-2141 [60, 86]	121,5	2,9	121,5	19,7	11,3	
CITS25, Polar Instruments	122,7	3,9	112,1	10,4	7,2	Помимо параметров w , s , t , h , ε учитывается только толщина паяльной маски

Анализ результатов, приведенных в Таблица 2, позволяет сделать следующие выводы:

- наименьшую погрешность расчета (2,9%) дифференциального полного сопротивления микрополосковой пары I обеспечивает формула, приведенная в стандарте IPC-2141, погрешность расчетов, выполненных в программе Polar Instruments на 1% выше, однако формулы из стандарта IPC-2141A имеют недопустимо высокую погрешность порядка 20%;
- относительно невысокую (7,2%) погрешность расчета дифференциального полного сопротивления микрополосковой пары II обеспечивает только Polar Instruments, погрешность формул из стандартов IPC-2141 и IPC-2141A недопустимо высока (11,3% и 29,4% соответственно). Вероятная причина высокой погрешности – отсутствие учета влияния многих факторов.

Выявленные в результате анализа преимущества и недостатки рассматриваемых методов сгруппированы Таблица 3.

Таблица 3. Выявленные преимущества и недостатки методов расчета

Метод	Преимущества	Недостатки
По инженерным формулам	• Простота расчета (по формулам из IPC-2141)	• Большая погрешность • Громоздкость формул (по формулам из IPC-2141A) • Не учитывается влияние многих факторов (например, паяльной маски и влагозащитного покрытия)
С применением программных продуктов для проектирования печатных плат	• Средняя погрешность • Учитывается влияние паяльной маски в CITS25	• Высокая стоимость многих программных продуктов
Метод конечных элементов (используется для расчета емкости, по которой определяется дифференциальное полное сопротивление)	• Низкая погрешность • Возможность исследования практически любых сечений печатных плат • Возможность анализа влияния многих существенных факторов (в том числе, паяльной маски и влагозащитного покрытия) • Низкая стоимость программного обеспечения (стоимость годовой лицензии ELCUT для вузов 10 тыс. руб.)	• Сравнительно ограниченно пригоден для инженерного применения

Третья глава посвящена разработке модели микрополосковой дифференциальной пары. Волновое сопротивление Z линии связи без потерь, в которой существует Т-волна, определяется выражением:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\sqrt{\mu\epsilon}}{C},$$

где L – погонная индуктивность, C – погонная емкость, μ – абсолютная магнитная проницаемость среды, ϵ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды.

Если считать материалы линии передачи немагнитными, то выражение для волнового сопротивления линии связи примет следующий вид:

$$Z = \frac{\sqrt{\mu_0 \epsilon_{\text{eff}} \epsilon_0}}{C}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, ϵ_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость, ϵ_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Распространение сигнала в дифференциальной паре принято представлять в виде совокупности четной и нечетной мод. Дифференциальное полное сопротивление равно сумме волновых сопротивлений первой и второй линии в режиме нечетной моды. Эквивалентная емкость первой линии в режиме нечетной моды равна:

$$C_1 = C_{11} + 2C_{12},$$

где C_{11} – частичная емкость первого проводника, C_{12} – взаимная емкость между первым и вторым проводниками.

Перепишем (1) с учетом выше сказанного, а также представляющего интерес влияния одиночного проводника в виде микрополосковой линии, расположенного рядом с проводником 2 (см. Рис. 8):

$$Z_{\text{диф}} = Z_{1\text{нм}} + Z_{2\text{нм}} = \frac{\sqrt{\mu_0 \epsilon_{1\text{eff}} \epsilon_0}}{C_{11} + 2C_{12}} + \frac{\sqrt{\mu_0 \epsilon_{2\text{eff}} \epsilon_0}}{C_{22} + 2C_{12} + 2C_{23}}, \quad (2)$$

где $Z_{1\text{нм}}$ – волновое сопротивление первой линии в режиме нечетной моды, $Z_{2\text{нм}}$ – волновое сопротивление второй линии в режиме нечетной моды, $\epsilon_{1\text{eff}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость среды вокруг первого проводника, $\epsilon_{2\text{eff}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость среды вокруг второго проводника, C_{22} – частичная емкость второго проводника, C_{23} – взаимная емкость между вторым и третьим проводниками.

В Таблица 4 приведены названия и обозначения факторов, а также натуральные значения на уровнях «-1», «0», «+1»

Таблица 4. Факторы, влияние которых исследовалось. Натуральные значения факторов на уровнях приведены в микрометрах, кроме факторов x2, x8, x10

Кодовое обозначение фактора	Условное обозначение фактора	Название фактора	Натуральные значения факторов на уровнях			Учет влияния фактора в формулах IPC-2141A
			-1	0	+1	
x ₁	$h_{\text{подл}}$	толщина подложки	150	300	450	да
x ₂	$\epsilon_{\text{подл}}$	диэлектрическая проницаемость подложки	2	4	6	да
x ₃	$h_{\text{пров}}$	толщина проводников	17,5	35	52,5	да
x ₄	w_1	ширина проводника 1	150	300	450	учитываются, но $w_1 = w_2$
x ₅	w_2	ширина проводника 2	150	300	450	
x ₆	s_{12}	зазор между проводниками 1 и 2	200	400	600	да
x ₇	$h_{\text{п.м.}}$	толщина паяльной маски	17,5	35	52,5	нет
x ₈	$\epsilon_{\text{п.м.}}$	диэлектрическая проницаемость паяльной маски	1,75	3,5	5,25	нет
x ₉	$h_{\text{вл}}$	толщина влагозащитного покрытия	35	70	105	нет
x ₁₀	$\epsilon_{\text{вл}}$	диэлектрическая проницаемость влагозащитного покрытия	1,75	3,5	5,25	нет
x ₁₁	s_{23}	зазор между проводниками 2 и 3	400	800	1200	нет
x ₁₂	w_3	ширина проводника 3	150	300	450	нет
x ₁₃	$s_{1\text{п}}$	зазор между проекцией проводника 1 на полигон заземления и краем полигона заземления	400	800	1200	нет
x ₁₄	$s_{\text{отв-п}}$	расстояние от края щели до края полигона заземления	500	1000	1500	нет
x ₁₅	$d_{\text{щ}}$	ширина щели	1000	2000	3000	нет

Рассчитанные линейные эффекты позволяют существенно уточнить модель для определения дифференциального полного сопротивления, приведенную в стандарте IPC-2141A. Уточненная модель имеет следующий вид:

$$Z_{diff} = \frac{174}{\sqrt{\varepsilon_{подл} + 1,41}} \ln\left(\frac{5,98h}{0,8w + t}\right) \left(1 - \exp\left(\frac{-0,96s}{h}\right)\right) - 0,79 \frac{h_{н.м.} - 35}{17,5} - 5,99 \frac{\varepsilon_{н.м.} - 3,5}{1,75} - 2,87 \frac{h_{в.л} - 70}{35} - 4,67 \frac{\varepsilon_{н.м.} - 3,5}{1,75} + 2,83 \frac{s_{23} - 800}{400} - 0,42 \frac{w_3 - 300}{150} - 0,90 \frac{s_{щ} - 1000}{500} + 0,68 \frac{d_{щ} - 2000}{1000} - 24,26.$$

На Рис. 9 приведена зависимость относительной погрешности расчета дифференциального полного сопротивления микрополосковой пары по не уточненной и уточненной модели от отклонения значений факторов от нулевого уровня. Анализ графиков, приведенных на Рис. 9, позволяет сделать следующие выводы:

- погрешность уточненной модели меньше во всем рассматриваемом диапазоне значений факторов;
- в центре диапазона погрешность уточненной модели минимальна;
- при значениях факторов меньше нулевого уровня погрешность уточненной модели не превышает 6,5%. Учитывая постоянное уменьшение размеров проводников и зазоров между ними, невысокая погрешность расчета в данной области является существенным преимуществом уточненной модели над аналогами.



Рис. 9. Зависимость относительной погрешности расчета дифференциального полного сопротивления микрополосковой пары по не уточненной (пунктирная линия) и уточненной (сплошная линия) формулам от отклонения значений факторов от нулевого уровня

Четвертая глава посвящена разработке и внедрению методики проектирования дифференциальных пар. Отличительной особенностью предлагаемой методики (Рис. 10) является более полный учет влияния конструкторско-технологических параметров на

дифференциальное полное сопротивление пары. Для обеспечения пригодности методики к инженерному применению была разработана программа «Оптимизатор параметров микрополосковой дифференциальной пары», позволяющая подобрать значения конструкторско-технологических параметров пары так, чтобы ее дифференциальное полное сопротивление соответствовало требуемому с учетом допуска.

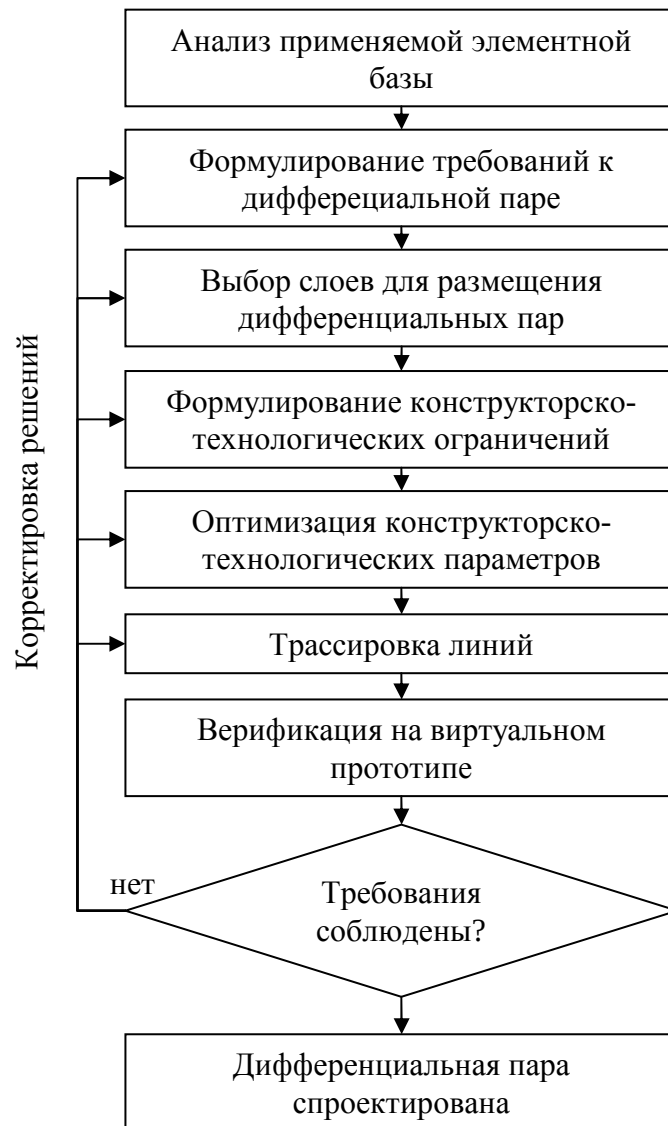


Рис. 10. Этапы проектирования дифференциальной пары

На основе уточненной модели, полученной в работе, была написана программа, позволяющая оптимизировать конструкторско-технологические параметры дифференциальной пары, целевая функция – разность расчетного и требуемого дифференциальных полных сопротивлений, критерий оптимальности: $Z_m - \varepsilon^- \leq Z \leq Z_m + \varepsilon^+$, где Z_m – требуемое дифференциальное полное сопротивление, ε^- и ε^+ – допуски в

меньшую и большую стороны соответственно, Z – расчетное дифференциальное полное сопротивление. Блок-схема использованного в программе алгоритма приведена на Рис. 11.

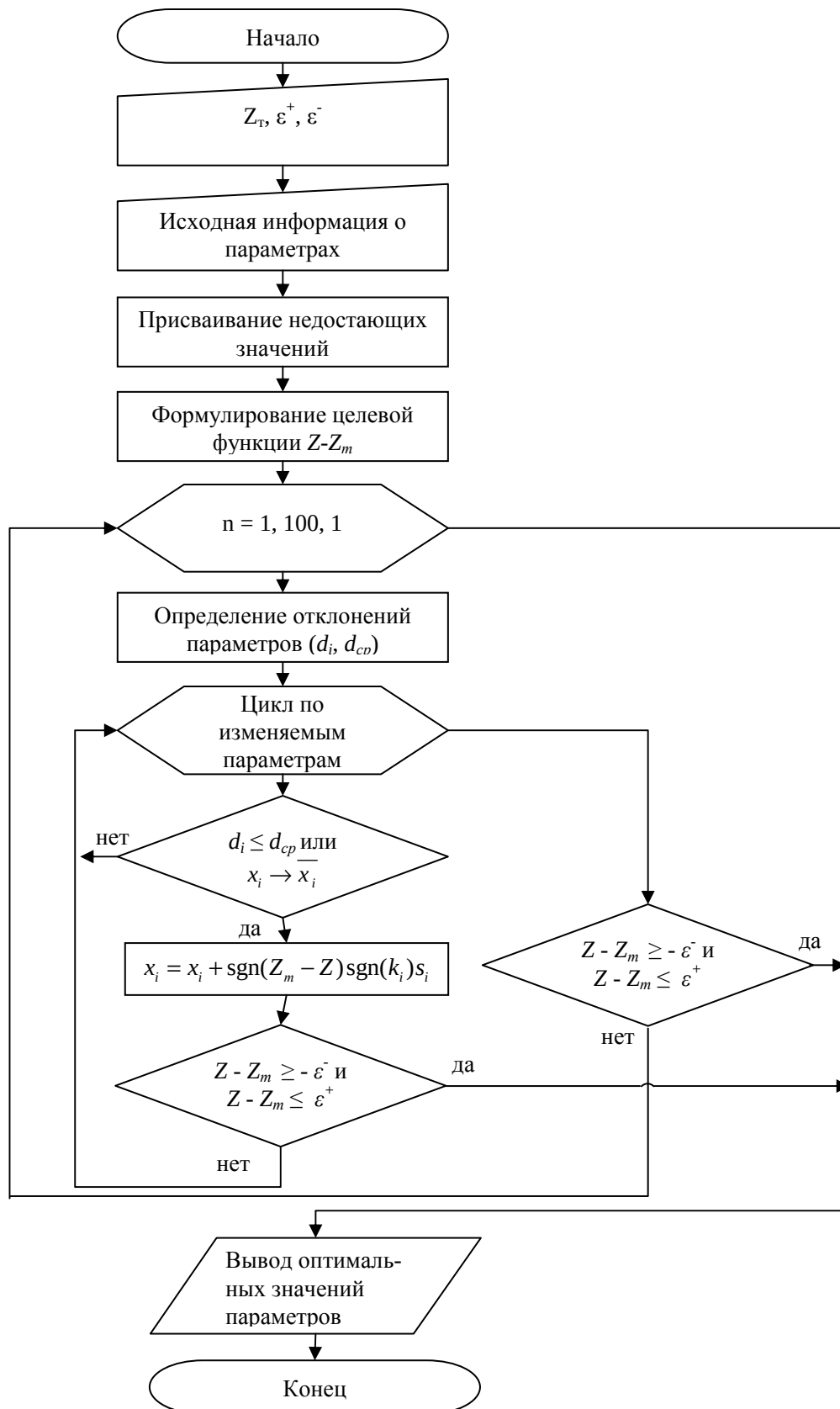


Рис. 11. Блок-схема алгоритма оптимизации параметров пары

Экспериментальная проверка использованных в методике подходов и моделей проводилась следующим образом. Для дифференциальных пар в исследуемом печатном узле различными методами было рассчитано дифференциальное полное сопротивление. Дифференциальное полное сопротивление также было измерено методом рефлектометрии (TDR) с помощью прибора CITS900s4 производства Polar Instruments

В Таблица 5 приведены расчетные и измеренные значения дифференциального полного сопротивления исследуемой пары. Наименьшая погрешность относительно ELCUT обеспечивается при расчете в разработанной программе «Оптимизатор параметров микрополосковой пары», а измеренное значение примерно на 10 Ом отличается от расчетного. По-видимому, это объясняется погрешностью проведенных измерений.

Таблица 5. Расчетные и измеренные значения дифференциального полного сопротивления исследуемой микрополосковой пары

Метод определения	Дифференциальное полное сопротивление, Ом	Погрешность относительно ELCUT, %
Расчет электростатического поля в ELCUT	91,1	-
Расчет в программе «Оптимизатор параметров микрополосковой дифференциальной пары» (по уточненной формуле)	89,5	1,8
Расчет в CITS25, Polar Instruments	86,5	5,1
Измерение методом рефлектометрии, CITS900s4	100,5	10,3

В **заключении** сформулированы основные выводы по диссертационной работе в целом.

Основные результаты работы

В процессе решения задач, поставленных в диссертации, получены следующие основные научные результаты:

1. Проведен анализ проблемы целостности сигнала в дифференциальной паре. Проанализирован разбег мод и его последствия для целостности сигнала. Показано, что паяльные маски и влагозащитные покрытия существенно (до двух раз) снижают разбег мод. Проанализировано влияние встроенных резисторов на целостность сигнала. Показано, что из-за больших допусков на сопротивление встроенных резисторов в худшем случае коэффициент отражения примерно в три раза превышает максимально допустимый (0,05).
2. Вскрыты преимущества и недостатки существующих методов расчета дифференциального полного сопротивления. Предложен способ построения новой

модели дифференциальной пары на основе уточненной инженерной формулы. Для уточнения формулы предлагается учесть влияние большего числа существенных факторов (паяльной маски, влагозащитного покрытия, ближайшего одиночного проводника и др.), используя вычислительный эксперимент.

3. Разработана модель дифференциальной пары, учитывающая зависимость дифференциального полного сопротивления пары от 13 существенных конструкторско-технологических факторов. Следует отметить, что большая часть рассматриваемых факторов (таких, как толщина и диэлектрическая проницаемость влагозащитного покрытия, расстояние и диаметр до отверстия в плате) в ранее существующих моделях не учитывалась.
4. Предложена методика проектирования дифференциальных пар, основанная на учете влияния конструкторско-технологических параметров дифференциальной пары на ее электрофизические характеристики.
5. Разработано программное обеспечение, позволяющее оптимизировать параметры пары под требуемое дифференциальное полное сопротивление.
6. Проведена апробация и внедрение разработанной методики и программного обеспечения в практику промышленного проектирования и в учебный процесс вуза.

Публикации по теме диссертации

1. **Кечиев Л.Н., Нисан А.В. Анализ зависимости дифференциального полного сопротивления с поперечным сечением в виде микрополосковой линии от конструкторско-технологических факторов // Технологии ЭМС. – 2007. – №3. С. 48–54.**
2. Кечиев Л.Н., Нисан А.В. Оптимизация конструкторско-технологических параметров дифференциальной пары с поперечным сечением в виде микрополосковой линии. Сборник докладов десятой Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости ЭМС-2008. – С.-Пб.: ВИТУ, 2008. – с. 431 – 435.
3. Кечиев Л.Н., Нисан А.В. Анализ влияния конструкции дифференциальной пары на ее электрофизические характеристики. 7-й международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: Труды симпозиума. 26–29 июня 2007 г. – Санкт-Петербург, 2007. – С.290–293.
4. Кечиев Л.Н., Нисан А.В. Применение теории планирования эксперимента для исследования зависимости дифференциального полного сопротивления

микрополосковой пары от конструкторско-технологических факторов Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств / под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2007. – С.92–100.

5. Кечиев Л.Н., Нисан А.В. Оптимизация конструкторско-технологических параметров микрополосковой дифференциальной пары. Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств / под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2008. – С.92–97.
6. Нисан А.В. Анализ зависимости электрофизических параметров дифференциальной пары с поперечным сечением в виде микрополосковой линии от конструкторско-технологических факторов. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ: Тез. докл. – Москва, 2007.
7. Нисан А.В. Оптимизация конструкторско-технологических параметров микрополосковой дифференциальной пары. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ: Тез. докл. – Москва, 2008.
8. Нисан А.В. Методика проектирования дифференциальных пар в печатных узлах устройств телекоммуникаций. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ: Тез. докл. – Москва, 2009.
9. **Кечиев Л.Н., Нисан А.В. Особенности проектирования дифференциальных пар. Технологии ЭМС. – 2008. – № 3. – с. 68–75.**
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008612070 "Оптимизатор параметров микрополосковой дифференциальной пары", выданное Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
11. Нисан А.В., Соловьев А.В. Школа поверхностного монтажа: Введение в поверхностный монтаж. Технологии приборостроения. – 2007. – №1. – С. 56–66.
12. Нисан А.В., Соловьев А.В. Школа поверхностного монтажа: Трафаретная печать. Технологии приборостроения. – 2007. – №3. – С. 62–71.
13. Нисан А.В., Соловьев А.В. Школа поверхностного монтажа: Дозирование. Технологии приборостроения. – 2007. – №4. – С. 61–72.
14. Нисан А.В., Соловьев А.В. Школа поверхностного монтажа: Установка компонентов. Технологии приборостроения. – 2008. – №1. – С. 64–71.
15. Нисан А.В., Соловьев А.В. Школа поверхностного монтажа: Пайка оплавлением. Технологии приборостроения. – 2008. – №2. – С. 62–71.