

На правах рукописи

**Смирнов Александр Михайлович**

**МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ  
МОДУЛЕЙ ДЛЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ УСТРОЙСТВ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2012

Работа выполнена на кафедре «Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы» Московского государственного института электроники и математики (технического университета)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Кечиев Леонид Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Саенко Владимир Степанович

кандидат технических наук  
Нисан Антон Вячеславович

Ведущая организация: ФГБОУВПО "Московский государственный  
технический университет радиотехники,  
электроники и автоматики"

Защита состоится «15» марта 2012 г. В 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.133.06 Московского государственного института электроники и математики (технического университета) по адресу: 109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., д.3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного института электроники и математики (технического университета).

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2012 г.

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

Н.Н. Грачев

## **Общая характеристика работы**

### ***Актуальность работы***

На сегодняшний день перед разработчиками современной телекоммуникационной аппаратуры открываются широкие возможности по выбору различных вариантов исполнения изделий и технологий их производства. Основой любого устройства телекоммуникации является подложка, которая содержит токоведущий контур и на которую в процессе сборки изделия монтируются электрорадиоизделия (ЭРИ). В технологии производства быстродействующей цифровой телекоммуникационной аппаратуры наилучшим образом себя зарекомендовали подложки на основе керамики и подложки на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ).

Традиционные стеклотекстолитовые печатные платы, широко используемые в качестве основы устройств телекоммуникаций, производимых с применением технологии поверхностного монтажа, имеют весьма ограниченную область применения. Свойства базового материала позволяют использовать их только в изделиях, работающих на частотах до 2 ГГц. При более высоких частотах передачи данных резко возрастают потери в диэлектрике, и, как следствие, нарушается целостность передаваемого сигнала. Частоты, на которых осуществляется передача данных в современных быстродействующих устройствах телекоммуникаций, могут составлять несколько десятков гигагерц. Фронты передаваемых сигналов уменьшаются, предъявляя жесткие требования к повышению скоростей передачи данных и к согласованию линий передачи. Реалии сегодняшнего дня таковы, что требования рынка диктуют необходимость создания миниатюрных цифровых быстродействующих устройств телекоммуникации, обладающих высочайшей надежностью и имеющих уникальные эксплуатационные характеристики. Заданным требованиям в полной мере отвечают телекоммуникационные устройства, выполненные с применением керамики с низкой температурой обжига (КНТО). При разработке устройств телекоммуникаций, выполненных с применением КНТО, разработчикам необходимо, помимо прочего, учитывать особенности применяемых конструктивных материалов (керамики, металлизационных резистивных и токопроводящих паст), параметры производственного процесса (разрешающая способность процесса фотолитографии, возможности по созданию минимальных расстояний проводник/зазор) и т.д.

В этих условиях, перед разработчиками быстродействующих устройств телекоммуникации встает ряд новых задач. Стоимость единичных серий изделий, изготовленных на основе керамических модулей достаточно высока. Цена ошибки разработчиков и конструкторов возрастает. Появляется ряд задач в области обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). В частности, задачи обеспечения целостности сигнала, уменьшения перекрестных помех, согласования линий передачи. С целью сокращения затрат на доработку неработоспособных изделий возникает необходимость в использовании

современных методов проектирования, которые учитывают особенности различных технологических процессов производства изделий, свойства применяемых материалов и их влияние на конечные свойства изделий. Существующие на сегодняшний день методы проектирования зачастую не учитывают всех необходимых параметров. В этой связи, возникает необходимость в разработке новых методов, позволяющих с высокой точностью рассчитать и сконструировать работоспособную цифровую быстродействующую телекоммуникационную аппаратуру, изготавливаемую с применением современных конструктивных материалов.

На сегодняшний день на рынке программного обеспечения представлено множество продуктов, направленных на решение специфических конструкторских задач при проектировании устройств телекоммуникаций. Это как, ставшие стандартными инструментами разработчиков программные пакеты от Mentor Graphics Technologies, Cadence и Zuken, так и многофункциональные узконаправленные программы производства компаний Polar Instruments, IMST и др. Применение данных продуктов целесообразно с точки зрения повышения точности инженерных расчетов, однако, не всегда целесообразно с экономической точки зрения. Стоимость специализированного программного обеспечения высока и зачастую сравнима со стоимостью разработки изделия. В этой связи, для частных компаний, специализирующихся на создании конкурентоспособных телекоммуникационных изделий, производимых небольшими партиями, использование подобных дорогостоящих инструментов проектирования может оказаться нецелесообразным.

Тенденции развития современных телекоммуникационных устройств связаны с повышением быстродействия, увеличением частот передачи сигналов, снижением длительности фронтов передаваемых сигналов. В этой связи, одной из ключевых задач при проектировании устройств телекоммуникаций является решение вопросов, связанных с задержкой распространения сигналов, искажения формы сигналов, согласования линий передачи и отражения сигналов в линиях передачи, которые тесно связаны с проблемой сохранения целостности сигналов. В этой связи, поскольку инструменты и методы, используемые при проектировании изделий на основе стеклотекстолитовых печатных плат, в условиях разработки устройств на основе многослойных керамических подложек неэффективны, возникает необходимость в создании методов и инструментов, которые помогут разработчикам устройств телекоммуникаций сократить время проектирования и повысить эффективность процесса.

Существенный вклад в решение проблемы проектирования быстродействующих устройств телекоммуникаций внесли советские и российские ученые: А.Д. Князев, Б.В. Петров, Л.Н. Кечиев, С.Ф. Чермошенцев, Т.Р. Газизов, Б.Н. Файзулаев, В.Г. Журавский, П.В. Степанов, Ю.А. Чурин, а также зарубежные ученые Эрик Богатин (E. Bogatin), Кейт Армстронг (Keith Armstrong), Абе Рирази (Abe Riazi), Дуглас Брукс (Douglas Brooks), Ховард Джонсон (Howard W. Johnson), Тим Уильямс (Tim Williams) и другие.

### ***Цель работы***

Целью настоящей работы является сохранение целостности сигнала при его передаче в межсоединениях КНТО за счет учета электрофизических, технологических и топологических параметров многослойных керамических модулей на ранних этапах проектирования.

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

1. Проведен анализ существующих технологий производства быстродействующих телекоммуникационных устройств, перспектив развития технологий, общемировых тенденций в производстве устройств телекоммуникаций.
2. Проведен анализ особенностей проектирования телекоммуникационных устройств на основе керамики с низкой температурой обжига.
3. Разработана математическая модель для определения значения волнового сопротивления микрополосковых линий передачи с учетом дополнительных конструкторско-технологических факторов, а именно: подтравов проводников, влияния кусочно-однородной среды.
4. Проведен анализ влияния погрешности встроенных и внешних согласующих резисторов микросхем нагрузки на целостность сигнала при передаче в устройствах быстродействующей телекоммуникационной аппаратуры.
5. Разработан метод проектирования быстродействующих устройств телекоммуникаций на основе многослойных керамических модулей с нормируемым волновым сопротивлением.
6. Разработаны рекомендации по проектированию телекоммуникационных устройств на основе многослойных керамических модулей, изготавливаемых по технологии КНТО.

### ***Методы исследования***

При решении поставленных задач были использованы принципы системного подхода, методы теории планирования эксперимента, метод конечных элементов, теория длинных линий, методы математического моделирования.

### ***На защиту выносятся:***

- Математическая модель микрополосковой линии передачи, выполненной на многослойных керамических модулях, изготовленных по технологии КНТО, учитывающая: изменение значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  в широком диапазоне, влияние подтравов проводников и кусочно-однородной среды на значение волнового сопротивления;
- метод проектирования многослойных керамических модулей для быстродействующих устройств телекоммуникаций, учитывающий на этапе разработки изделий возможность возникновения помех отражения при передаче сигнала;

- рекомендации по проектированию быстродействующих устройств телекоммуникаций на основе многослойных керамических модулей.

### ***Научная новизна***

Научная новизна заключается в разработке метода проектирования микрополосковых линий передачи верхних слоев многослойных керамических модулей, отличительной особенностью которого является более полный и точный учет влияния на волновое сопротивление существенных конструкторско-технологических параметров: подтравов проводников, диэлектрической проницаемости и толщины защитного компаунда. Разработанный метод проектирования позволяет учесть возникновение помех отражения в линии передачи на этапе проектирования и принять меры для их устранения.

### ***Практическая значимость работы:***

- получена математическая модель расчета волнового сопротивления микрополосковой линии передачи на многослойных керамических модулях, учитывающая зависимость волнового сопротивления от ранее не учитываемых значимых факторов;
- разработан метод проектирования быстродействующих устройств телекоммуникаций, позволяющий сократить временные и экономические затраты на разработку новых устройств за счет более точного расчета параметров линий передачи на ранних стадиях проектирования.
- разработана программа для расчета значения волнового сопротивления микрополосковых линий передачи многослойных керамических модулей быстродействующих устройств телекоммуникаций для ЭВМ.

### ***Реализация результатов и предложения об использовании***

Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в практику проектирования на предприятии ЗАО «Инструментальные системы». Разработанные в процессе написания диссертационной работы методические указания внедрены в учебный процесс ФГБОУВПО МИЭМ на кафедре "Радиоэлектронные и телекоммуникационные устройства и системы" по дисциплинам «Основы проектирования РЭС», «Технология поверхностного монтажа».

Полученные в диссертационной работе результаты рекомендуется использовать при проектировании современных быстродействующих устройств телекоммуникаций, конструкция которых предусматривает наличие многослойных керамических модулей.

### ***Апробация результатов работы***

Результаты представлялись и докладывались на Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ, Москва, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 гг., Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Саратов, 2008, Первой всероссийской конференции «Силовая электроника»,

Москва, 2008, Десятой научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности Санкт-Петербург, 2008.

В 2008, 2011 годах результаты работы были признаны лучшими среди работ, представленных на Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ и удостоены диплома I степени.

### ***Публикации***

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах из перечня ВАК, 6 тезисов докладов, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### ***Структура работы***

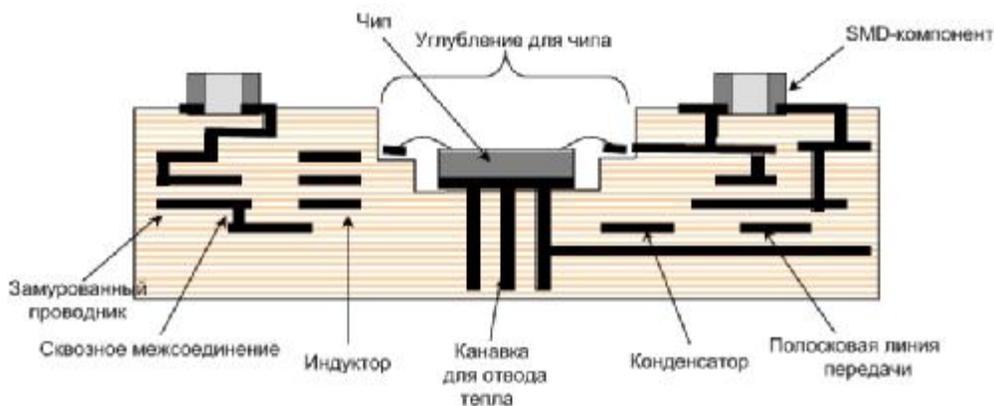
Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы. В приложении приведены акты внедрения и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### ***Содержание работы***

В **первой главе** проведен анализ состояния проблемы целостности сигнала и электромагнитной совместимости, анализ применяемых в промышленности материалов для производства основы быстродействующих устройств телекоммуникаций, описаны их преимущества и недостатки. Показано развитие устройств телекоммуникаций. Показаны преимущества и недостатки различных материалов оснований подложек изделий быстродействующей телекоммуникационной аппаратуры. По результатам анализа материалов отмечена технология изготовления многослойных керамических модулей КНТО (рис.1), как наиболее перспективная для создания основы современных устройств телекоммуникаций. Технология КНТО позволяет создавать модули для устройств телекоммуникаций, обладающие следующими особенностями и отличительными характеристиками:

- минимальные потери сигнала на частотах до 60 ГГц;
  - высокая механическая прочность и теплопроводность по сравнению с остеклотекстолитовыми печатными платами;
  - высокая стойкость к климатическим воздействиям;
  - возможность создания внутренних пассивных компонентов, что позволяет минимизировать размеры подложек более чем на 50% по сравнению с печатными платами;
- и т.д.

Проведен анализ технологии изготовления многослойных керамических модулей и влияние технологии на параметры линий передачи. Подробно рассмотрены технологии создания топологии верхних слоев керамических модулей, показана необходимость учета влияния подтравов проводников, образующихся при применении различных процессов литографии, на электрофизические параметры линий передачи.



**Рис. 1. Пример конструкции многослойной керамической подложки, изготовленной по технологии КНТО**

Проведен анализ методов проектирования цифровой быстродействующей телекоммуникационной аппаратуры, показана низкая эффективность существующих методов для использования в условиях применения многослойных керамических модулей, рассмотрены возможные нарушения целостности сигнала, их причины и задачи обеспечения целостности сигнала и электромагнитной совместимости.

Анализ технологий герметизации полупроводниковых приборов устройств телекоммуникационной аппаратуры показал, что на сегодняшний день перспективным направлением является использование различных полимерных материалов для защиты устройств от внешних воздействий.

При нанесении на поверхность линии передачи полимерного компаунда образуется кусочно-однородная среда передачи сигналов, параметры которой влияют на значение волнового сопротивления линий передачи. Как показал проведенный анализ методик проектирования устройств телекоммуникаций, для учета кусочно-однородной среды во всех существующих моделях при расчетах волнового сопротивления возникает необходимость в определении эффективной диэлектрической проницаемости, что в большинстве случаев представляет собой сложную математическую задачу.

Проведен анализ современной элементной базы. Показано, что погрешность встроенных согласующих резисторов современных микросхем может приводить к возникновению помех отражения и нарушению целостности сигнала. Анализ методов проектирования многослойных керамических модулей для быстродействующих устройств телекоммуникаций показал, что на сегодняшний день отсутствуют методы проектирования многослойных керамических модулей, учитывающие параметры встроенных согласующих резисторов микросхем нагрузки.

Показано, что одна из основных проблем, с которой сталкиваются разработчики многослойных керамических модулей для быстродействующих устройств телекоммуникаций заключается в том, что данные модули имеют ярко выраженную трехмерную структуру, интегрированные компоненты и проводники здесь располагаются ближе друг к другу, поэтому хорошо зарекомендовавшие себя методики проектирования топологий печатных плат и интегральных схем не подходят для их разработки.

В первой главе также показаны перспективы создания миниатюрных телекоммуникационных устройств на основе многослойных керамических модулей. Технология производства многослойных керамических структур позволяет интегрировать пассивные компоненты в единое изделие, тем самым значительно уменьшая конечные размеры устройств телекоммуникаций. Платы, изготовленные по технологии КНТО несут функции подложек, на которые монтируются ЭРИ. При этом, существует возможность монтажа как бескорпусных электрорадиоэлементов (ЭРЭ), так и ЭРЭ в стандартных корпусах. В то же время, методики проектирования быстродействующих устройств телекоммуникаций, учитывающие все конструкторско-технологические особенности многослойных керамических подложек, на сегодняшний день отсутствуют.

На основе проведенного анализа и исследований сформулированы цели и задачи диссертационной работы, показана ее актуальность и научная новизна.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели линии передачи повышенной точности, учитывающей влияние ранее не рассматриваемых факторов на значение волнового сопротивления линии передачи. Наряду с ранее рассматриваемыми факторами показано влияние на значение волнового сопротивления микроплатовой линии передачи подтравов печатных проводников, диэлектрической проницаемости и толщины полимерного компаунда, дано обоснование причин, по которым их необходимо учитывать.

Особое внимание уделено рассмотрению влияния подтравов проводников, которые возникают при создании верхнего токопроводящего слоя керамических модулей при использовании технологии Fodel. Показано, как подтравы верхней и нижней сторон проводника, возникающие при использовании различных технологий травления, влияют на значение волнового сопротивления линии передачи и коэффициент отражения (рис.2, рис.3).

Приведен анализ методов расчета электрофизических параметров линий передачи и современных инструментов, применяемых разработчиками, указаны их достоинства и недостатки, дано обоснование выбора метода конечных элементов для расчета параметров разработанной математической модели. Был проведен анализ программных средств, реализующих численные вычисления электрофизических параметров линий передачи с применением метода конечных элементов. Среди прочих это: FlexPDE, PDEase2D, QuickField, Maxwell Spicelink, ELCUT. По результатам проведенного анализа был выбран программный комплекс ELCUT в качестве инструмента для проведения вычислительных экспериментов.

Дано обоснование использования метода планирования эксперимента для анализа влияния изменения различных факторов на значение волнового сопротивления линии передачи и получения математической модели линии передачи повышенной точности.

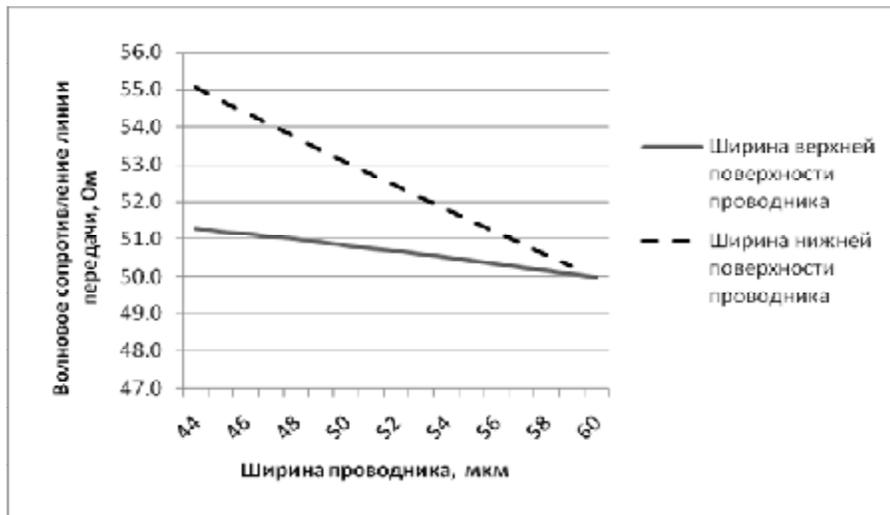


Рис. 2. Влияние изменения ширины сторон проводника на значение волнового сопротивления

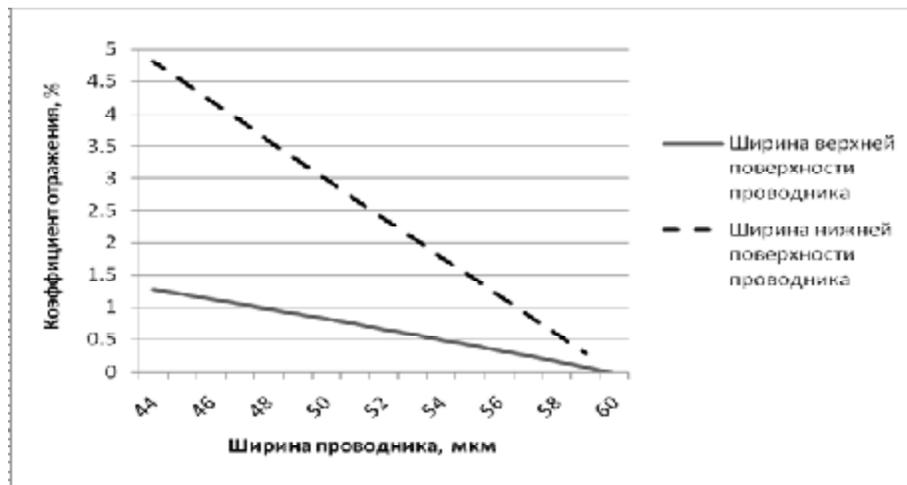


Рис. 3. Влияние изменения ширины сторон проводника на значение коэффициента отражения

Для проведения экспериментальных расчетов значений электрофизических параметров линий передачи был выбран метод Бокса-Уилсона (рис. 4) в качестве основополагающего в связи со следующими причинами:

- применимость метода к решению поставленной задачи;
- наличие литературных источников, подробно описывающих данный метод;
- простота реализации метода;
- наличие сертифицированного программного обеспечения (программный комплекс STATISTICA), позволяющего осуществлять расчеты с применением метода крутого восхождения;
- возможность существенно сократить количество необходимых опытов для построения модели микрополосковой линии.

Для проведения вычислительных экспериментов по определению влияния различных параметров микрополосковых линий передачи верхних

слоев многослойных керамических модулей на электрофизические параметры линий передачи определена область значений рассматриваемых факторов (табл. 1).

**Таблица 1. Область значений рассматриваемых факторов**

№	Условн. Обозн.	Название фактора	Минимальное значение	Максимальное значение
1	$W_1$	Ширина нижней поверхности печатного проводника, мкм	20	60
2	$W_2$	Ширина верхней поверхности печатного проводника, мкм	20	60
3	$\epsilon_{кер}$	Диэлектрическая проницаемость керамической основы	4	10
4	$h_{кер}$	Толщина керамического слоя, мкм	40	220
5	$h_{пп}$	Толщина печатного проводника, мкм	10	30
6	$\epsilon_{пк}$	Диэлектрическая проницаемость полимерного компаунда	2	6
7	$h_{пк}$	Толщина слоя полимерного компаунда, мкм	50	150

Спланированы и проведены с использованием программного комплекса ELCUT вычислительные эксперименты по определению электрической емкости микрополосковых линий передачи и эффективной диэлектрической проницаемости подложек в различном конструктивном исполнении.

На основании выражения (1) определено значение волнового сопротивления микрополосковой линии передачи в каждом из смоделированных случаев.

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

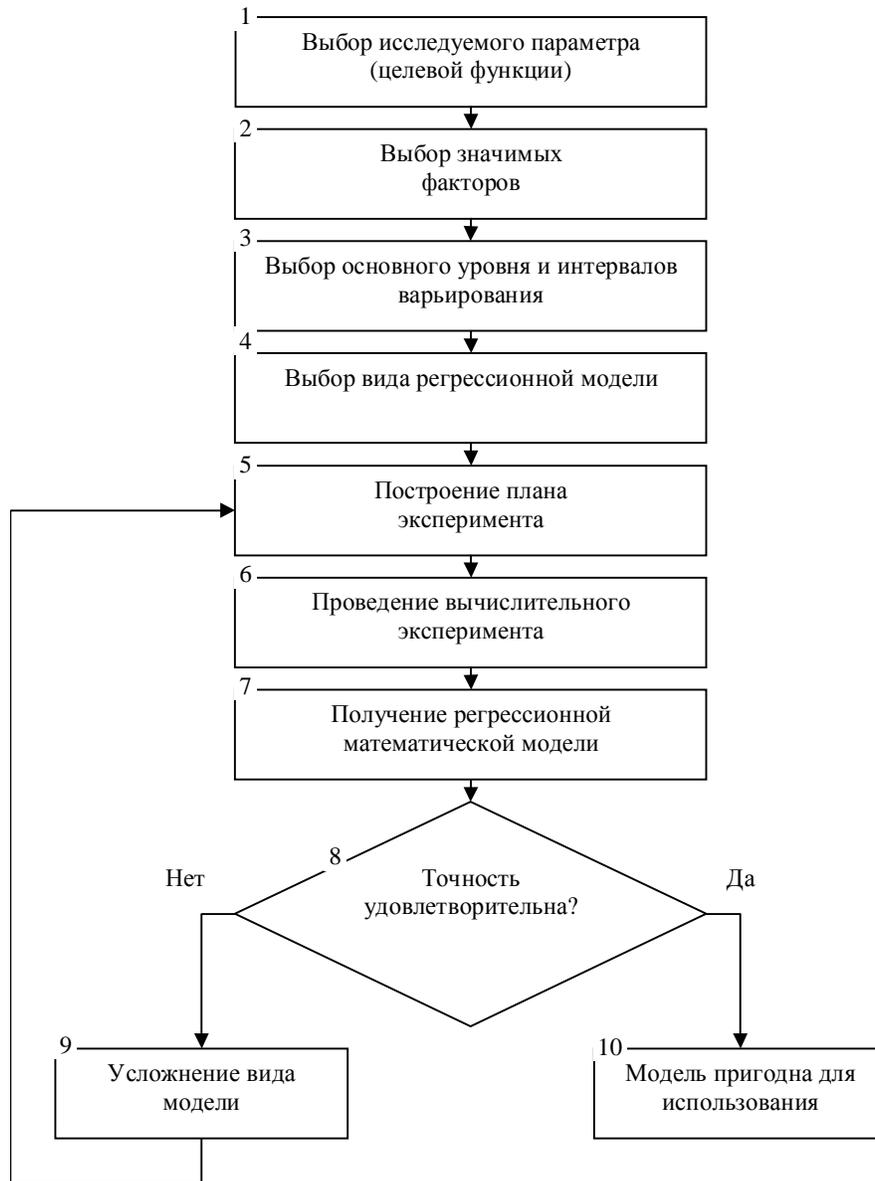
где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м;  $\epsilon_{эф}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость;

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная, равная  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $C$  – электрическая емкость линии передачи, Ф

С применением методики проведения эксперимента, представленной на рис. 4. получена математическая модель для расчета волнового сопротивления микрополосковых линий передачи устройств быстродействующей телекоммуникационной аппаратуры, выполненных на основе КНТО (2).

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \ln \left( \frac{5,98h}{0,59w_1 + 0,176w_2 + t} \right) - \sqrt{h_{пк}} - 5,71 \frac{\epsilon_{пк} - 4}{2}, \quad (2)$$

где  $Z_0$  – Волновое сопротивление микрополосковой линии передачи, Ом;  
 $\epsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость подложки;  $\epsilon_{пк}$  – диэлектрическая проницаемость полимерного компаунда;  $h_{пк}$  – толщина полимерного компаунда, мкм;  $h$  – толщина подложки, мкм;  $w_1, w_2$  – ширина нижней и верхней сторон проводника соответственно, мкм;  $t$  – толщина проводника, мкм.



**Рис. 4. Методика проведения эксперимента в соответствии с методом Бокса-Уилсона**

Приведены результаты сравнительных расчетов значений волнового сопротивления линий передачи, выполненные с применением различных моделей. На примере расчета волнового сопротивления микрополосковой линии передачи с параметрами, приведенными в Таблице 2, показана эффективность полученной математической модели сравнительно с применяемыми ранее (рис. 5). Погрешность в расчетах значения волнового сопротивления, полученная с применением данной модели, по сравнению с экспериментальными данными, составила не более 5%. Коэффициент отражения, рассчитанный по формуле (3) составил 0,3%, в то время, как при расчетах с применением традиционных математических моделей, коэффициент отражения равен 2,05%. Учитывая погрешность согласующих резисторов более 5% и технологические допуски на создание топологии верхних слоев керамических модулей, результирующий коэффициент отражения, в случае

применения на этапе проектирования быстродействующих устройств телекоммуникаций традиционных математических моделей расчета, обладающих низкой точностью, может составить более 10%.

$$k_r = \frac{RI - Z}{RI + Z}, x = l, \quad (3)$$

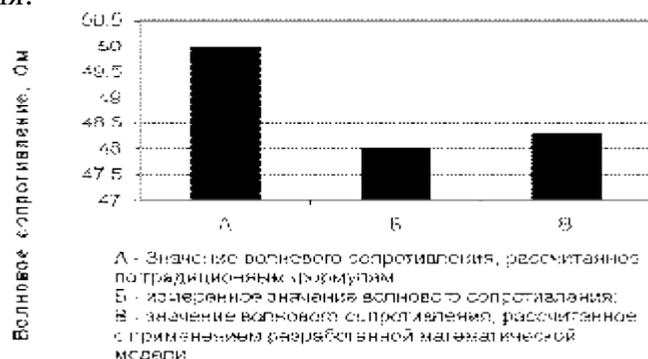
где  $RI$  – сопротивление линейной нагрузки в конце линии передачи, Ом;  
 $Z$  – волновое сопротивление линии передачи, Ом;  $x$  – координата вдоль линии передачи, м;  $l$  – длина линии передачи, м.

Для бесперебойного функционирования цифровой быстродействующей аппаратуры рассогласование значений волнового сопротивления линии передачи и нагрузки не должно превышать 5-10%. Полученная модель позволяет обеспечить точность расчетов, отвечающую обозначенному выше требованию.

**Таблица 2. Параметры микрополосковой линии передачи, заложенные на этапе конструирования**

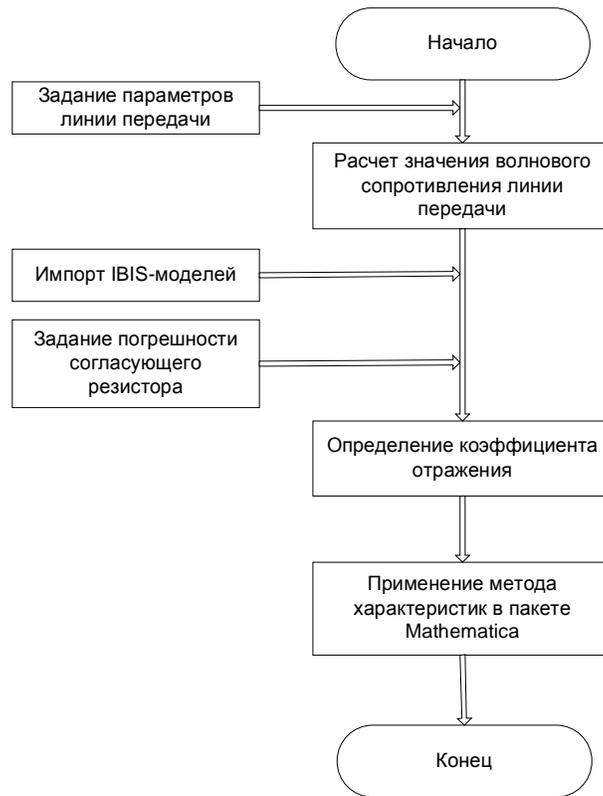
Параметр	Значение	Примечания
Количество слоев керамического модуля	5	-
Частота передачи сигнала, ГГц	15,76	-
Толщина верхнего слоя керамики после обжига, мкм	40	Материал DuPont GreenTape 951
Диэлектрическая проницаемость керамической основы	7,8	На частоте 10 ГГц
Толщина проводника, мкм	10	Материал DuPont 6453
Ширина проводника, мкм	40	Из расчета необходимости создания волнового сопротивления 50 Ом
Полимерный компаунд	Отсутствует	-

Показано, что использование математической модели (2) для расчета значения волнового сопротивления микрополосковых линий передачи на ранних этапах проектирования быстродействующих устройств телекоммуникаций позволяет повысить точность расчетов и, как следствие, сократить издержки, связанные с доработкой конструкции на последующих этапах проектирования.



**Рис. 5. Сравнение расчетов значения волнового сопротивления с применением различных моделей**

В **третьей главе** рассмотрены вопросы сохранения целостности сигнала при его передаче в электрически длинных линиях в быстродействующих узлах телекоммуникационной аппаратуры. Рассмотрены различные схемы согласования линий передачи по волновому сопротивлению, методы расчета помех отражения. Проведен анализ особенностей реализации метода характеристик в программной среде Mathematica. Проанализированы структуры, описание и метод получения IBIS-моделей микросхем, рассмотрены вопросы внедрения IBIS-моделей в методику проектирования быстродействующих устройств телекоммуникаций. Предложен алгоритм расчета помех отражения, учитывающий конструкторско-технологические параметры линий передачи, погрешность внешних и встроенных согласующих резисторов, вольт-амперные характеристики микросхем нагрузки (рис. 6).

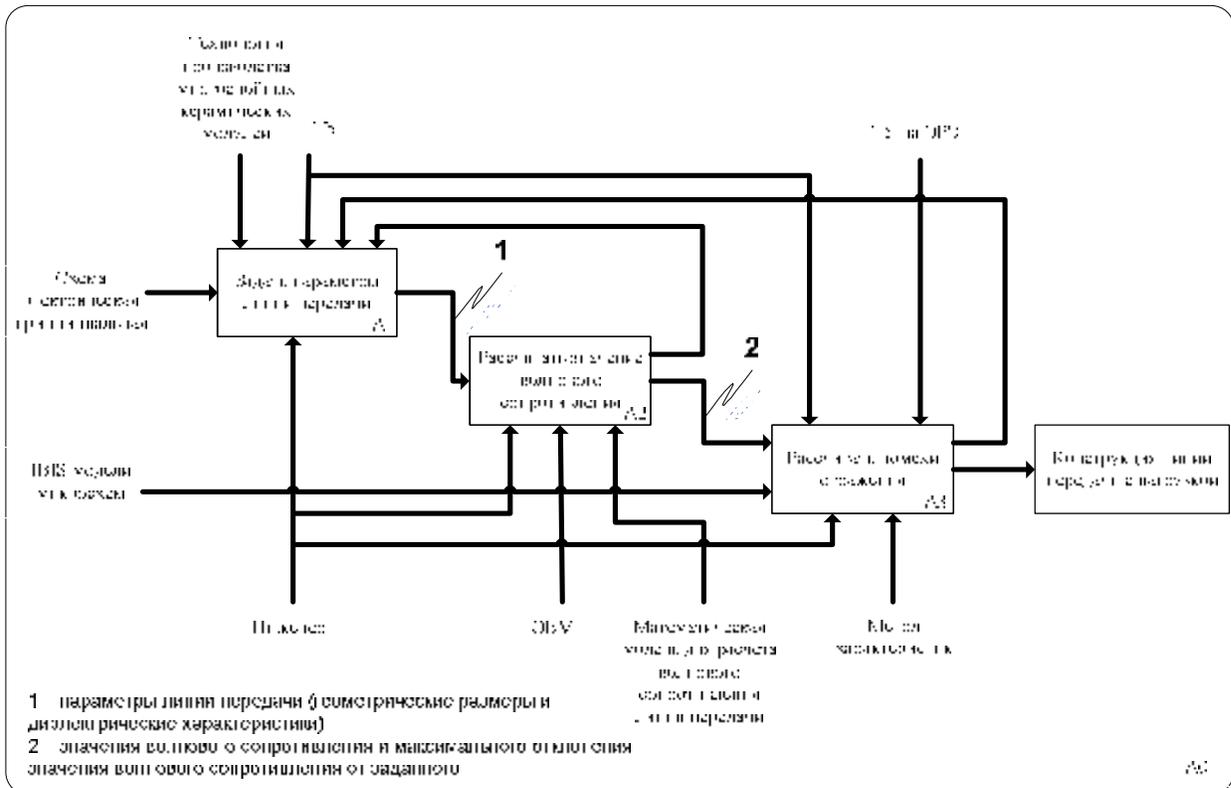


**Рис. 6** Алгоритм расчета помех отражения в линии передачи с нагрузкой

Расчет отражений в соответствии с предложенным алгоритмом показал, что в случае, если при проектировании не учитывать погрешность согласующих резисторов (встроенных и внешних), может произойти нарушение целостности сигнала при его передаче. Расхождение реального значения волнового сопротивления с нормируемым из-за выбора неправильного инструмента расчета с большой погрешностью, или неучтенной погрешности согласующих резисторов может привести к тому, что линия передачи перестанет быть согласованной, в нужный момент уровень сигнала не достигнет уровня логической «1» и микросхема не переключится. Применение предложенного алгоритма позволяет на ранних стадиях проектирования

оценить помехи отражения и принять решение о допустимости применяемых проектных решений и соответствия результатов техническому заданию.

В четвертой главе приводится разработка инженерного метода проектирования быстродействующих устройств телекоммуникаций на основе многослойных керамических модулей, учитывающая влияние технологии производства изделий на электрофизические параметры и сохранение целостности сигнала (рис.7).



**Рис. 7. Увеличенная IDEF0-диаграмма метода проектирования многослойных керамических модулей для быстродействующих устройств телекоммуникаций**

Детально рассмотрена последовательность действий при использовании предложенного метода проектирования, даны рекомендации по конструированию и производству быстродействующих устройств телекоммуникаций на основе многослойных керамических модулей.

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 существующих технологических операций производства быстродействующих телекоммуникационных устройств, перспектив развития технологий, общемировых тенденций в производстве устройств телекоммуникаций. Проведенный анализ показал, что на сегодняшний день применение в быстродействующих устройствах телекоммуникаций

многослойных керамических подложек, изготовленных по технологии КНТО в качестве альтернативы стеклотекстолитовым печатным платам позволяет минимизировать размеры изделий и способствует сохранению целостности передаваемого сигнала на частотах в десятки гигагерц.

2. Проведен анализ особенностей проектирования телекоммуникационных устройств на основе керамики с низкой температурой обжига. Показано, что учет технологии производства многослойных керамических модулей, применяемых типов оборудования и материалов на этапе разработки изделий является необходимостью.
3. Разработана математическая модель для определения значения волнового сопротивления микрополосковых линий передачи с учетом дополнительных конструкторско-технологических факторов, а именно, подтравов проводников, влияния кусочно-однородной среды. Данная модель учитывает особенности производства модулей по технологии КНТО и оперирует большим числом конструкторско-технологических факторов, чем предыдущие модели, что позволяет повысить точность расчетов при проектировании быстродействующих устройств телекоммуникаций.
4. Проведен анализ влияния погрешности встроенных и внешних согласующих резисторов микросхем нагрузки на целостность сигнала при передаче в устройствах быстродействующей телекоммуникационной аппаратуры. Анализ показал, что для создания линий передачи с контролируемым волновым сопротивлением возможным представляется использование для согласования линий передачи как внешних методик согласования, так и применение микросхем со встроенными согласующими резисторами. При этом, вне зависимости от способа согласования, в связи с погрешностями в значениях сопротивлений резисторов и технологическими допусками на производство керамических подложек, возникают помехи отражения, величину которых целесообразно учитывать на этапе разработки изделий. Рассчитав с помощью полученной математической модели волновое сопротивление, можно оценить помехи отражения и их возможное влияние на функционирование устройства.
5. Разработан метод проектирования многослойных керамических модулей для быстродействующих устройств телекоммуникаций. Данный метод позволяет повысить эффективность процесса проектирования, благодаря решению проблем сохранения целостности сигнала на ранних стадиях проектирования и отсутствию необходимости дорогостоящих доработок изделия в самом конце процесса проектирования.
6. Разработаны рекомендации по конструированию многослойных керамических модулей для быстродействующих устройств телекоммуникации. Рекомендации учитывают особенности технологических процессов как производства керамических подложек, так и их последующей сборки. Данные рекомендации направлены на помощь разработчикам отследить возможные проблемы целостности сигнала и

технологические проблемы на ранних этапах проектирования и предотвратить их.

7. Проведена апробация и внедрение разработанной методики в практику промышленного проектирования и в учебный процесс вуза.

**Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:**

1. **Смирнов А.М., Особенности конструирования многослойных керамических изделий, изготавливаемых по технологии LTCC. – Технологии ЭМС. – 2009. - №3. – С. 69-80.**
2. **Алешин А. В., Кечиев Л. Н., Смирнов А. М. Волновое сопротивление микрополосковых линий передачи в печатном монтаже. – Технологии ЭМС. – 2008. - №2. - С. 24 – 26.**
3. Смирнов А.М. Обеспечение целостности сигнала в высокоскоростных цифровых устройствах на основе керамических модулей. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ: Тез. докл. – М.: Изд-во МИЭМ. – 2011. – С. 213–214.
4. Смирнов А.М. Микрополосковая линия передачи в кусочно-однородной среде с учетом подтравов печатных проводников. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ: Тез. докл. – М.: Изд-во МИЭМ. – 2009. – С. 124-125.
5. Смирнов А.М. Новые возможности контрактного производства по технологии LTCC. - Степень интеграции. – 2009. - №1. – С. 32-35.
6. Смирнов А.М. Обеспечение целостности сигнала в высокоскоростных цифровых устройствах на основе керамических модулей. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ: Тез. докл. – М.: Изд-во МИЭМ. – 2010. – С. 167–168.
7. Смирнов А. М. Анализ влияния подтравов печатных проводников на волновое сопротивление линии передачи в печатных платах. Сборник научных трудов «Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств». – М.: МИЭМ. – 2008. – С. 85 – 91.
8. Смирнов А.М. Испытания электронных компонентов на пригодность к отмывке с использованием ультразвука. – Технологии приборостроения. – 2007 - №2. – С. 34-37.
9. Смирнов А.М. Математическая модель микрополосковой линии передачи в кусочно-однородной среде с учетом подтравов печатных проводников. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ: Тез. докл. – М.: Изд-во МИЭМ. – 2009. – С. 67–69.
10. Смирнов А.М. Анализ влияния подтравов печатных проводников на волновое сопротивление линии передачи в печатных платах. – Сборник докладов десятой научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности ЭМС 2008 – СПб – 2008 – «ВИТУ». – С. 435-440.

11. Смирнов А.М. Герметизация пространства под корпусами электронных компонентов. – Поверхностный монтаж. – 2008. – №12. – С. 26-29.
12. Смирнов А.М., Лёвкина О.А. – Микроэлектроника: отмывка повышает надежность. – Технологии приборостроения. – 2008. - №1. – С. 22-26.
13. Ефремов А.А., Новиков С.Н., Егоров Г.В., Егоров В.А., Нисан А.В., Смирнов А.М. – Рекомендации по конструированию печатных узлов. – пособие по конструированию – Москва, ЗАО Предприятие Остек. – 2008 – 276 с.
14. Смирнов А.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009613555 "Расчет волнового сопротивления микрополосковой линии передач», выданное Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.



