

На правах рукописи

Сорокин Сергей Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИНИЙ СВЯЗИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
КОМПЛЕКСОВ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2016

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени
АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов
имени М.А. Карцева», г. Москва

Научный руководитель: **Чудинов Станислав Михайлович**,
заслуженный деятель науки РФ, доктор
технических наук, профессор

Официальные
оппоненты: **Шубарев Валерий Антонович**,
доктор технических наук, профессор,
главный конструктор открытого
акционерного общества «Авангард»,
г. Санкт – Петербург

Вишневский Алексей Сергеевич,
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник отдела метрологии и
разработки Научно-образовательного центра
«Технологический центр» Физико-
технологического института (МГУПИ -
МИРЭА), г. Москва.

Ведущая организация: Публичное акционерное общество
«Институт электронных управляющих
машин им. И.С. Брука», г. Москва
(Министерство промышленности и торговли
РФ)

Защита диссертации состоится «08» сентября 2016 г. в 11 – 00 часов на
заседании диссертационного совета Д 217.047.01 во ФГУП «Научно-
исследовательский и экспериментальный институт автомобильной
электроники и электрооборудования» по адресу: 105187, Москва,
ул. Кирпичная, д. 39-41.

Автореферат разослан

«8» июня 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 217.047.01,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Варламов О.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка научных основ дальнейшего совершенствования элементов и схем вычислительной техники является одной из первостепенных по актуальности современных задач научно-технического прогресса. К направлениям исследований, ориентированных на наращивание показателей производительности вычислительных устройств, относятся вопросы совершенствования конструкций многослойных печатных плат (МПП) как основных несущих и коммутирующих элементов современных вычислительных комплексов, и в числе первоочередных — проблемы эффективного моделирования линий связи МПП. Необходимость максимального использования скоростных свойств логических элементов субнаносекундного диапазона выдвигает комплекс требований в отношении характеристик импульсных высокочастотных сигналов, передаваемых по уплотненным коммутационным сетям МПП с усложненной топологией и, прежде всего, обеспечения структурной целостности сигналов в условиях увеличения интенсивности перекрестных помех, энергетических потерь и возрастания роли фактора электромагнитной совместимости. Путями реализации этих задач являются разработка новых методов синтеза и анализа моделей переходных процессов при прохождении сигналов субнаносекундного диапазона в коммутационных линиях МПП с энергетическими потерями, создание и исследование моделей функционирования линий связи МПП с учетом паразитных характеристик реальных соединений, создание теоретической базы для синтеза новых топологических моделей линий связи МПП с минимизированными факторами искажения сигналов, разработка и апробация методов, алгоритмов и программных приложений для поддержки процессов проектирования и диагностики параметров усовершенствованных конструкций МПП.

Несмотря на интенсивные исследования по различным аспектам проблемы моделирования линий связи МПП, вышеперечисленные задачи, связанные с анализом и синтезом линий связи МПП для высокопроизводительных вычислительных комплексов субнаносекундного диапазона, включая специальные коммутационные элементы в виде линий задержки меандровой структуры, а также с разработкой программных приложений для поддержки новых методик предпроектного моделирования инновационных конструкций МПП с гибкой топологией линий связи, представляют собой открытые и актуальные для исследования научные задачи в области создания и совершенствования элементов и устройств вычислительной техники.

Степень научной разработанности темы. Выбор тематики диссертационного исследования обусловлен многогранностью процессов и явлений, возникающих при передаче высокочастотных сигналов по печатным

проводникам в МПП. Проблема взаимного влияния сигналов субнаносекундного диапазона, проходящих по близко расположенным печатным проводникам, с учетом количества слоев современных МПП и плотности расположения печатных линий связи на этих слоях, весьма актуальна для разработчиков высокопроизводительных вычислительных устройств. Создание необходимого инструментария возможно лишь после тщательной проработки теоретических и методологических подходов к моделированию поведения сигналов субнаносекундного диапазона в МПП высокопроизводительных вычислительных устройств. Анализ научных источников показал недостаточность исследований, проводимых в данной области. В частности, остаются малоизученными концептуальные, методологические и практические основы проектирования линий связи МПП в устройствах субнаносекундного диапазона, существенные для специалистов, занимающихся разработкой вычислительной техники. Актуальность, теоретическая и практическая значимость развития и реализации комплексной методологии проектирования линий связи МПП в современных условиях, а также недостаточная степень разработанности проблемы, ее многоаспектность обусловили выбор темы диссертационного исследования, формулировку цели и задач исследования.

Целью диссертационной работы является совершенствование методологии проектирования высокопроизводительных вычислительных комплексов на основе применения разработанных методов и алгоритмов моделирования линий связи печатных плат с оптимизацией топологических характеристик, параметров помехоустойчивости и обеспечения целостности передачи логических сигналов субнаносекундного диапазона.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие научные задачи: проведен анализ современного состояния, методов, результатов и основных тенденций в области проектирования линий связи для МПП элементов вычислительной техники; сформирована концепция комплексного подхода к решению задач оптимизации электрических и конструктивных параметров линий связи высокопроизводительных вычислительных комплексов на основе разработки специализированной технологии моделирования; разработан графоаналитический метод моделирования процессов передачи сигналов субнаносекундного диапазона в меандровых линиях задержки многослойных печатных плат высокопроизводительных вычислительных комплексов с учетом параметров перекрестных помех, предложена модификация частотного метода исследования трансформаций высокочастотных импульсных сигналов в линиях связи МПП с потерями, базирующаяся на использовании аппарата интегральных преобразований; разработана и реализована концепция создания программного обеспечения для компьютерного моделирования линий связи гибкой топологии в МПП

высокопроизводительных вычислительных комплексов субнаносекундного диапазона с применением предложенной технологии, обеспечивающего высокие показатели целостности высокочастотных логических сигналов, передаваемых по печатным линиям связи.

Объектом исследования являются линии связи МПП высокопроизводительного вычислительного устройства.

Предметом исследования являются методы синтеза и анализа моделей передачи сигналов субнаносекундного диапазона в линиях связи и линиях задержки меандровой структуры для МПП высокопроизводительных вычислительных комплексов, а также методологии создания программных приложений для компьютерной реализации технологий моделирования линий связи.

Научная новизна работы обусловлена:

1. Разработкой комплексного подхода к моделированию линий связи многослойных печатных плат вычислительных комплексов с гибкой топологической структурой и оптимизированными факторами сохранения целостности высокочастотных импульсных логических сигналов, включающего:

- формирование системы расчетных соотношений технологии моделирования высокоэффективных линий связи МПП с топологической структурой и минимизированными факторами искажения сигналов;

- разработку графоаналитического метода моделирования процессов распространения импульсных сигналов субнаносекундного диапазона в многосекционных меандровых линиях задержки МПП вычислительных комплексов с учетом интенсивных перекрестных помех;

- разработку модифицированного частотного метода исследования трансформации импульсных сигналов в линиях связи с потерями применительно к элементам вычислительной техники в виде многослойных печатных плат.

2. Реализацией концепции создания программного приложения для компьютерного моделирования линий связи с гибкой топологией и высокими показателями обеспечения целостности сигналов в МПП высокопроизводительных вычислительных комплексов субнаносекундного диапазона на основе применения разработанной технологии моделирования.

Практическая ценность результатов исследований определяется их использованием при разработке программного приложения TopoR для компьютерного моделирования и проектирования линий связи МПП высокопроизводительных вычислительных комплексов субнаносекундного диапазона, обладающего конкурентными преимуществами по обеспечению целостности высокочастотных логических сигналов, передаваемых по уплотненным линиям связи. Разработки выполнены при непосредственном

участии и под руководством автора в ЗАО «НПФ «ДОЛОМАНТ», компании «Эремекс» и подтверждены актами внедрения.

Методы исследования базируются на аналитических расчетах с использованием физических законов электродинамики, на компьютерном моделировании электромагнитных процессов в цепях вычислительных устройств, на методологиях разработки программных приложений для реализации прикладных математических моделей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концепция комплексного подхода к решению задач оптимизации электрических и конструктивных параметров линий связи высокопроизводительных вычислительных комплексов на основе разработки специализированной технологии моделирования.

2. Графоаналитический метод моделирования процессов распространения импульсных сигналов субнаносекундного диапазона в многосекционных меандровых линиях задержки МПП высокопроизводительных вычислительных комплексов с учетом интенсивных перекрестных помех.

3. Усовершенствованная модификация частотного метода исследования трансформации импульсных сигналов в линиях связи с потерями применительно к элементам вычислительной техники в виде многослойных печатных плат.

4. Реализация концепции разработки программного приложения для компьютерного моделирования линий связи с гибкой топологией в МПП высокопроизводительных вычислительных комплексов субнаносекундного диапазона на основе применения предложенной технологии, обеспечивающей высокие показатели целостности высокочастотных логических сигналов, передаваемых по печатным линиям связи.

Достоверность выводов и рекомендаций подтверждается использованием в исследованиях апробированных математических методов и моделей электрофизических процессов; корректностью применяемых математических преобразований; отсутствием противоречий с известными теоретическими положениями; согласованностью результатов, получаемых для предельных частных случаев, с представленными в научной литературе результатами других исследований и опытными данными.

Апробация. Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на ряде научных конференций, совещаний и семинаров, в том числе на Международном форуме по встраиваемым системам Embedded World Exhibition and Conference (Германия, Нюрнберг, 17–25 февраля 2014 г.), на Национальных Суперкомпьютерных Форумах НСКФ-2014 и НСКФ-2015 (Россия, Переславль-Залесский, ИПС имени А.К. Айламазяна РАН, 25–27 ноября 2014 г., 25–27 ноября 2015 г.), на научных семинарах в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-

исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования» (2014–2015 гг.) и на научных семинарах Ордена Трудового Красного Знамени Акционерного общества «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева» (2014–2015 гг.)

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 16 научных работ, из них 6 публикаций в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 136 страницах общего текста и состоит из введения, четырех глав, заключения с основными выводами и результатами, списка использованных источников из 108 наименований и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности и охарактеризована степень разработанности темы диссертации, определены цели и задачи работы, описаны методы исследования, сформулированы положения научной новизны, достоверности, практической значимости и апробации результатов исследований, а также основные положения, выносимые на защиту. Дана характеристика публикаций по теме диссертации, структурных особенностей работы, а также соответствия профиля исследований позициям паспорта научной специальности 05.13.05.

В первой главе работы представлен анализ современного состояния разработок в области синтеза методов и алгоритмов моделирования линий связи МПП и охарактеризованы тенденции инновационных разработок в этой области. Отмечено, что наряду с известными зарубежными компаниями-разработчиками (Mentor Graphics, Cadence, Altium и др.) различные аспекты проблемы совершенствования методов проектирования линий связи МПП интенсивно и плодотворно разрабатываются целым рядом отечественных научных коллективов, в числе которых ученые Института проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Стемпковский А.Л., Гаврилов С.А. и др.), «Московского центра SPARC-технологий» (Рябцев Ю.С., Фельдман В.М., Воробушков В.М. и др.), Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Шелупанов А.А., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р.). Вместе с тем можно сделать заключение о недостаточной изученности данной проблемы применительно к проектированию линий связи МПП высокопроизводительной вычислительной техники субнаносекундного диапазона, что свидетельствует об актуальности темы данного диссертационного исследования. При этом отмечено, что теоретическая база моделирования линий связи МПП вычислительных устройств субнаносекундного диапазона должна формироваться с учетом специфики следующих взаимосвязанных факторов в процессах распространения сигнальных импульсов по длинным линиям

связи: особенностей оценки для характеристик задержки сигналов в длинных линиях связи; специфики и полноты согласования в длинных линиях связи; наличия потерь в длинных линиях связи; выраженной неоднородности линий связи по длине; наличия отводов от длинных линий связи; влияния формы сечений проводников в длинных линиях связи.

Далее в главе предложена концепция комплексного подхода к решению задач оптимизации электрических и конструктивных параметров линий связи МПП высокопроизводительных вычислительных устройств субнаносекундного диапазона на основе усовершенствованной технологии моделирования, структурная схема которой представлена на рисунке 1.

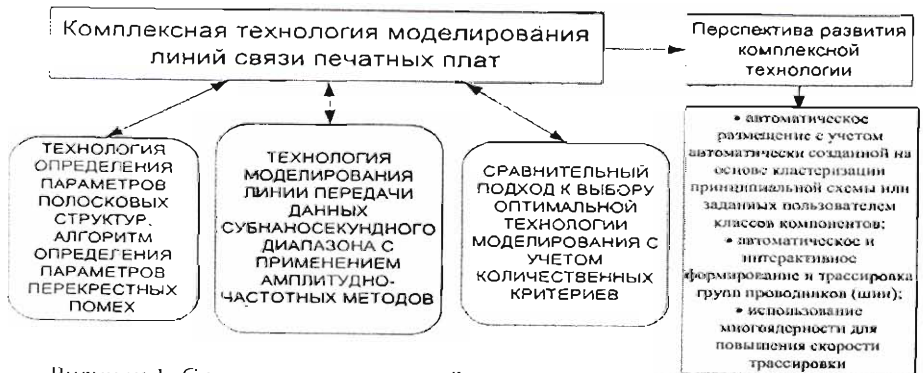


Рисунок 1. Структура комплексной технологии моделирования линий связи печатных плат для вычислительных комплексов и систем

Технология включает комплекс расчетных схем и формируется на базе международных и отечественных стандартов, в том числе межгосударственных стандартов ГОСТ 21552-84 «Средства вычислительной техники», на базе использования публикаций Международной электротехнической комиссии (МЭК), других выполненных научных разработок, а также предложенных в диссертации новых расчетных моделей, и в совокупности обеспечивает эффективное аналитическое моделирование и проектирование линий связи МПП высокопроизводительных вычислительных устройств субнаносекундного диапазона. Ее составными элементами являются модели и расчетные соотношения для анализа переходных процессов в линиях связи с учетом помех отражения для демпфированных линий; модели перекрестных помех соседних линий в контурах меандровых линий и амплитудных потерь интерфейсных связей; модели распространения сигнальных импульсов по длинным линиям связи с учетом специфики и полноты согласования, выраженной неоднородности по

длине, наличия отводов и ряда других факторов. Отдельно рассмотрен комплекс базовых соотношений для описания характеристик сечений проводников моделируемых линий связи. Технология позволяет определить первичные электрические параметры линий связи $C_0; L_0; L_j; R_0; R_j; G_0; C_m; L_m; G_m$, с позиции их проектирования для вычислительных комплексов, в качестве ведущего включает критерий сохранения целостности сигналов и призвана обеспечить прогнозирование работоспособности разрабатываемых электронных систем; оптимизацию коммутационной среды на всех конструктивных уровнях проектируемых МПП; обоснование рациональных технических решений при выборе элементной базы проектируемых устройств. Показано, что практическая ценность разрабатываемой технологии заключается в том, что сформированный комплекс расчетных методик и алгоритмов позволяет:

- сократить сроки принятия требуемых проектных решений в процессе автоматизированного проектирования МПП за счет исследования их параметрической чувствительности и решения на этой основе задачи определения траекторий размещения проводников наиболее рациональным способом с целью обеспечения оптимальных характеристик линий связи МПП;
- сократить сроки проектирования и снизить производственные затраты за счет уменьшения объема натурных испытаний проектируемых МПП;
- улучшить показатели надежности и другие эксплуатационные характеристики проектируемых МПП за счет принятия оптимальных проектных решений на основе анализа переходных характеристик в процессе схемотехнического проектирования;
- расширить топологический подход к автоматической и интерактивной трассировке МПП, развести трассы в областях компонентов с матричным расположением контактов на минимальном числе слоев и решить ряд задач локальной оптимизации топологии, для которых затруднительно предложить эффективные процедуры в рамках традиционных подходов.

Вторая глава работы посвящена разработке численно-аналитической методики моделирования и анализа переходных процессов с учетом факторов перекрестных помех в меандровых линиях задержки для МПП высокочастотных вычислительных устройств, топология которых характеризуется наличием одного или нескольких изломов на пути прохождения сигналов с поворотом на 180° (рисунок 2.). Рассматриваемая проблема обусловлена ограниченными возможностями увеличения точности определения вторичных параметров полосковых линий связи МПП с использованием международных стандартов IEC-2251, IEC-2241A, не

предусматривающих определение параметров переходных процессов в меандровых структурах, а также оценку перекрестных помех в линиях связи.

В рамках проведенных исследований разработан прикладной графоаналитический метод описания переходных процессов при распространении сигнальных импульсов различной относительной длины в двухсекционных и четырехсекционных линиях задержки меандровой структуры с учетом совокупности факторов искажения.

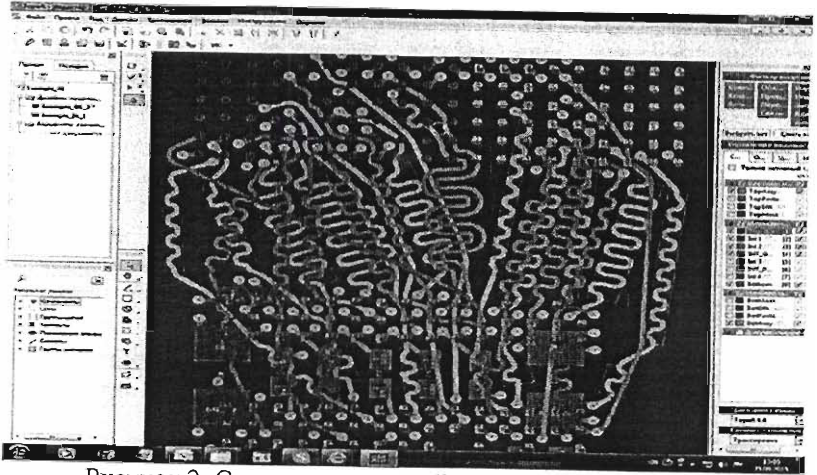


Рисунок 2. Структура печатной платы с меандровыми линиями задержки

Учитываемые при разработке метода механизмы образования перекрестных помех в меандровой линии связи представлены на рисунке 3, а предметом анализа является определение вторичных параметров: Z_0 ; T_0 ; $f - \alpha_0$; K_C ; K_L и параметров перекрестных помех. Использована также классификация типов линий, форм и параметров перекрестных помех, приведенная в таблице 1.

Представлен пример реализации разработанного метода применительно к описанию переходного процесса на конце двухсекционной ($n_s=2$) и четырехсекционной ($n_s=4$) линии для случая электрически длинной секции – задержка в одном изгибе (двух секциях) больше фронта перепада напряжения на входе линии $2l_s \geq t_{\phi}$.

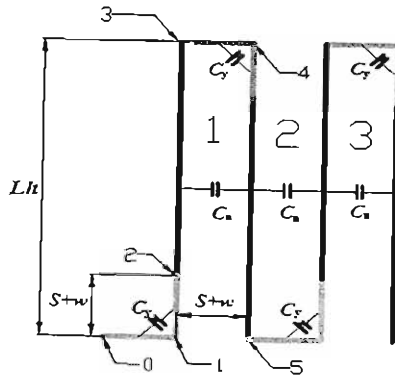


Рисунок 3. Механизм образования помехи в меандровой линии «змейка» (Lh – высота змейки, $S+w$ – шаг змейки, $Lh+S$ – длина секции змейки, C_v – взаимная ёмкость между витками, C_g – взаимная ёмкость между проводниками)

Таблица 1

Форма и параметры перекрестных помех в связанных линиях связи

Тип линии	Длинная, $2T_0 > t_\phi$	Короткая, $2T_0 < t_\phi$	$2T_0 = t_\phi$
Амплитуда обратной наводки (NEXT)	$U_{NEXT} = U_H \cdot K_C / 2$	$U_{NEXT} = (U_H \cdot K_C / 2) \cdot \frac{2t_s / t_s}{2t_s / t_s}$	$U_{NEXT} = U_H \cdot K_C / 2$
Длительность помехи	$2T_0 + t_\phi$	$2T_0 + t_\phi$	$2t_\phi$
Форма наводки	Трапеция	Трапеция	Треугольник

При этом, в частности, получены следующие аналитические и графические (рисунки 4 и 5) описания для анализируемых характеристик:

- задержанный выходной сигнал второй секции:
 $u_{\text{вых 2д 2}}(t) = u_{\text{вых 2}}(t - 2t_0 l_s);$
- амплитуда первой ступеньки: $U_{N1} = U_{NEXT1} \cdot K_C / 2 = U_H \cdot (K_C / 2)^2;$
- помеха от первого наклона: $u_{N1}(t) = \frac{K_C}{2} \cdot u_{NEXT1}(t);$
- наводка от основного фронта: $u_{N2}(t) = u_{NEXT1}(t - 2t_0 l_s);$
- наводка от спада: $u_{N3}(t) = -u_{N1}(t - 24l_s);$

- суммарный наведенный сигнал на выходе 4-й секции:

$$u_{NEXT2}(t) = u_{N1}(t) + u_{N2}(t) + u_{N3}(t);$$

- результирующий сигнал 4-й секции

$$u_{\text{вых } 2}(t) = u_{\text{вых зад } 2}(t) + u_{NEXT2}(t)$$



Рисунок 4 Воздействие обратной помехи на переходный процесс в конце первого изгиба (конец второй секции)

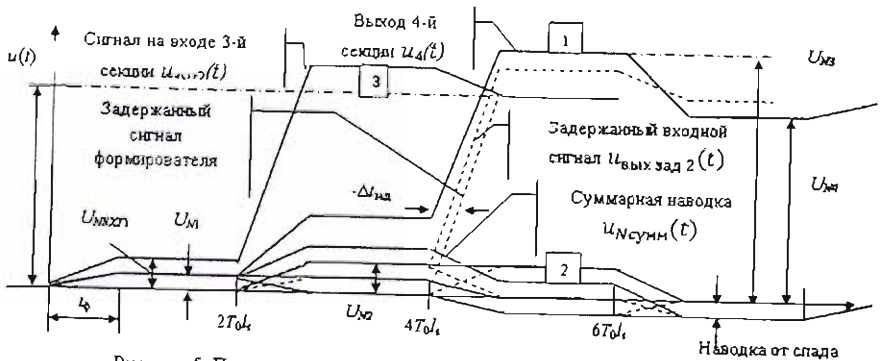


Рисунок 5. Переходный процесс в четырехсекционной линии задержки

В процессе анализа возможностей метода для оценки степени влияния параметров шага, длины и количества секций рассмотрены три варианта топологической структуры линий с равной длиной и различными показателями задержки и установлено, что расхождение результатов моделирования переходных процессов предложенным графоаналитическим

методом в сравнении с осциллограммами в формате 3D не превышает 5%. Проведенное исследование позволило сформулировать следующие выводы: минимальную площадь занимает линия задержки типа «прямая дорожка»; двухсекционная линия задержки является неоптимальной, т.к. не дает выигрыша в задержке, но снижает запас помехозащищенности; при сильной взаимной связи между секциями ($>10\%$) к зигзагообразной линии задержки необходимо добавлять дополнительные секции для компенсации эффекта форсирования фронта при передаче информационных сигналов. Сохранить приемлемую площадь под линией можно, если увеличить шаг между секциями, чтобы коэффициент связи не превышал 5%. Выполненное на базе применения метода сравнение деформации импульсов в линиях различной топологии позволяет определить оптимальные параметры геометрии при заданной задержке.

Во второй главе диссертации также разработана теоретическая методика оценки частотной границы допустимого использования приближенных моделей линий передачи при анализе цепей печатных плат. На основании применения методики для оценки частотной границы в использовании приближенных моделей линий передачи цепей печатных плат показано, что при максимально допустимом отклонении 7% верхняя граница диапазона, допускающего использование приближенных моделей линий передачи, составляет 3 ГГц.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований в главе сделано заключение об эффективности предложенных методик для определения значений реальной форсированной задержки в линиях передачи МПП для вычислительных устройств субнаносекундного диапазона. Полученные результаты являются элементами теоретической базы при разработке компьютерных программных приложений для эффективного проектирования и диагностики функционирования линий связи МПП высокопроизводительных вычислительных комплексов, включающих участки меандровой структуры.

В третьей главе работы определен комплекс исследовательских задач для решения прикладной проблемы сохранения форм импульсных сигналов субнаносекундного диапазона в линиях связи МПП вычислительных комплексов при действии факторов нелинейных искажений форм логических сигналов. Описаны механизмы минимизации влияния факторов энергетических потерь на характеристики целостности логических сигналов на основе анализа моделей трансформации профилей и энергетических характеристик сигналов, происходящих вследствие переходных процессов в линиях связи МПП с энергетическим рассеянием на высоких частотах. Синтез моделей линий передачи данных субнаносекундного диапазона с применением амплитудного и частотного методов позволяет оценить общее качество (целостность) сигналов в

разрабатываемой печатной плате. Передача импульсных сигналов с высокой частотой следования в согласованной печатной линии сопровождается затягиванием фронтов и уменьшением амплитуды импульсов, причем фронт логического сигнала на конце линии связи по форме становится существенно нелинейным по форме, в первую очередь, из-за частотной зависимости коэффициента затухания, определяемой скин-эффектом.

В главе представлены результаты разработки амплитудной модели по временному ряду, позволяющей описывать переходные процессы на конце согласованной линии передачи с потерями при возбуждении ее перепадами напряжений с конечной длительностью фронта и пригодной для описания реакции линии передачи на импульсы практически любой формы с использованием теоремы запаздывания. В качестве приближенного выражения переходной характеристики на выходе согласованной линии передачи с использованием амплитудной модели при $t_{\phi}=0$ рассматривается представление

$$h(t) = \frac{u_{out}(t)}{U_{in}} = 1 - \operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{\vartheta}}, \quad \vartheta = \frac{4t}{l^2 M^2}, \quad M = 2,05 \frac{\alpha [\text{дБ/М}]}{\sqrt{f [\text{МГц}]}}$$

где U_{in} — амплитуда логического перепада в начале линии $\operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{\vartheta}}$ — интеграл вероятности (функция Крампа), α — затухание гармонического сигнала в линии, рассчитанное или измеренное на частоте f .

В этом случае при конечном фронте входного перепада напряжения переходный процесс на выходе линии передачи описывается представлениями вида

$$\begin{cases} u_{out}(t \leq t_{\phi}) = \frac{2U_{in}}{\vartheta_{\phi}} A(\vartheta) \\ u_{out}(t > t_{\phi}) = \frac{2U_{in}}{\vartheta_{\phi}} [A(\vartheta) - A(\vartheta - \vartheta_{\phi})] \end{cases},$$

$$\text{где } \vartheta_{\phi} = \frac{4t_{\phi}}{l^2 M^2},$$

$$A(\vartheta) = \left(1 + \frac{\vartheta}{2}\right) \left(1 - \operatorname{erf} \frac{1}{\sqrt{\vartheta}}\right) - \sqrt{\frac{\vartheta}{\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{\vartheta}}$$

Таким образом, создается возможность расчета времени установления переходной характеристики линии передачи до заданного уровня и прогнозирования формы, амплитуды и времени установления сигналов на выходе согласованной линии передачи при возбуждении ее импульсами с конечной длительностью фронта.

Далее в главе представлены результаты анализа моделей переходных процессов в линиях связи с потерями применительно к процессам передачи импульсов в пачке с учетом кодовзависимых изменений ширины импульсов и задержки их фронтов.

Рассмотрены также вопросы моделирования трансформаций импульсных сигналов в линиях связи с потерями на базе методики интегральных преобразований. При исследовании используется введенное в монографии Джонсона Г., Грэхема М. «Высокоскоростная передача цифровых данных: высший курс черной магии» представление для амплитуды сигнала в линии с потерями

$$H_X(\omega) = e^{-X[(R + j\omega L)(G + j\omega C)]^{1/2}},$$

в котором R – погонное последовательное сопротивление линии [Ом/дм]; L – погонная последовательная индуктивность линии [Гн/дм]; C – погонная параллельная емкость линии [Ф/дм]; G – погонная параллельная проводимость линии [см/дм]; X – расстояние от входа линии до точки наблюдения [дм]; H – комплексная функция зависимости амплитудной и фазовой характеристики линии передач от частоты $\omega = 2\pi f$. Для печатных плат, работающих на частоте не выше 1 ГГц, можно принять $G=0$. После выделения в модифицированном представлении

$$H_X(\omega) = e^{-X[(R + j\omega L)(j\omega C)]^{1/2}}$$

вещественной и мнимой составляющих

$$H_X(\omega) = e^{-X \operatorname{Re}\{(R + j\omega L)(j\omega C)\}^{1/2}} e^{-jX \operatorname{Im}\{(R + j\omega L)(j\omega C)\}^{1/2}}$$

записывается коэффициент затухания гармонического сигнала на частоте f

$$\operatorname{Re}\{(R + j\omega L)(j\omega C)\}^{1/2},$$

а также сдвиг по фазе на частоте ω в радианах на единицу

$$e^{-jX \operatorname{Im}\{(R + j\omega L)(j\omega C)\}^{1/2}}$$

Для каждого электрического параметра в полученных соотношениях следует использовать представления, применимые в соответствующем рассматриваемом частотном диапазоне. Так, для погонной характеристики последовательного активного сопротивления проводника в высокочастотном диапазоне подлежит использованию соотношение, учитывающее влияние скин-эффекта локализации плотности высокочастотных токов

$$R_{AC}(f) = \frac{(2,61 \times 10^{-7})(f_{pr})^{1/2}}{\pi D},$$

в котором r_r – относительное удельное сопротивление материала проводника по отношению к удельному сопротивлению меди, f – частота [Гц], D – величина диаметра проводника. В качестве длины окружности сечения проводника для полосковых линий принимается $D=2(t+w)$. В низкочастотном диапазоне для вычисления погонного сопротивления проводника подлежит использованию формула

$$R(f) = \left\{ (R_{DC})^2 + |R_{AC}(f)|^2 \right\}^{1/2}$$

Для величин L_0 и C_0 в расчетах используются представления, задаваемые международным стандартом IEC-2251

$$C_0(\rho F / in) = \frac{T_{pd}(\rho s / in)}{Z_c(ohms)}$$

$$L_0(nH / in) = \frac{[Z_0(ohms)]^2 C_0(\rho F / in)}{1000}$$

$$T_{pd}(\rho s / in) = 1000 \left(\frac{1,017 \sqrt{\epsilon}}{12(in)} \right),$$

где T_{pd} – удельное время задержки сигнала в линии.

Метод частотного моделирования, адаптированный автором применительно к коммутационным линиям МПП сложного топологического строения, может быть успешно применен для учета частотно-зависимых потерь в линиях связи, а также и для учета влияния перекрестных помех, отражений от нагрузки, разбросов волнового сопротивления по длине канала связи, влияния характеристик разъемов печатных плат. Соответственно он

является перспективным для анализа моделей высокоскоростных линий связи МПП субнаносекундного диапазона при разработке элементной базы высокопроизводительных вычислительных комплексов с оптимизированными характеристиками. В качестве критериев оптимизации могут задаваться условия попадания заданной доли энергии сигнала конечной длительности в заданную совокупность частотных интервалов; синтеза сигналов с максимальной или минимальной концентрацией энергий в совокупности частотных интервалов и определение аддитивных компонент, трансформанты Фурье которых (соответствующих топологической конфигурации линии связи) имеют минимальное квадратичное отклонение от трансформант Фурье исходных сигналов в заданной совокупности частотных интервалов и от нулевого уровня за границей данной частотной совокупности.

В четвертой главе диссертации изложена концепция разработки программных приложений для моделирования линий связи МПП быстродействующих вычислительных устройств с использованием сформированного комплекса элементов технологии моделирования линий связи субнаносекундного диапазона в МПП, в рамках реализации которой созданы и апробированы составные элементы отечественного САПР-приложения **ToroR** с гибкой топологией коммутационных цепей.

Псказано, что разработанная методология синтеза гибкой топологической схемы линий связи обеспечивает оптимизацию показателей электромагнитной совместимости и помехоустойчивости проектируемых МПП, улучшение качества целостности сигналов за счет достижения усредненной изотропии трассировки, минимизации длины проводников и числа межслойных переходов, что обуславливает конкурентные характеристики спроектированных плат. Эффективность САПР-приложения **ToroR** достигается за счет сочетания следующих уникальных характеристик: высокой скорости трассировки, сокращающей время проектирования вычислительных устройств в десятки раз; широкого набора инструментов, обеспечивающего разработку плат с повышенной надежностью и позволяющего улучшить производственные и эксплуатационные показатели; отсутствия преимущественных направлений трассировки в слоях, существенного снижения протяженности параллельных трасс и уменьшения уровня перекрестных электромагнитных помех; применения гладких проводников без изломов, позволяющих более эффективно использовать свободное пространство печатной платы.

На основании выполненного и отраженного в таблице 2 сопоставительного анализа функциональных характеристик современных зарубежных программных приложений для автоматизированного проектирования печатных плат в работе дана детальная характеристика приоритетных решений, обеспечивающих конкурентные преимущества

разработанного с использованием предложенной технологии моделирования САПР-приложения **ТороR**. Отмечено, что основным недостатком зарубежных разработок для проектирования высокопроизводительных вычислительных комплексов, работающих с тактовой частотой более 1 ГГц, является отсутствие количественных критериев сохранения работоспособности проектируемых устройств, в том числе линий связи различной топологии.

Таблица 2

Интегральные результаты сравнений основных параметров приложений

№ п/п	Наименование параметра, критерия	Mentor Graphics Expedition	Mentor Graphics PADS	САПР ТороR
Электрические параметры линии связи МПП (первичные параметры)				
1	Погонная емкость линии – C_0	+	+	+
2	Внешняя погонная индуктивность линии – L_0	+	+	+
3	Внутренняя частотно-зависимая индуктивность проводников – L_f	+	+	+
4	Погонное активное сопротивление линии на постоянном токе – R_0	+	+	+
5	Частотно-зависимое поверхностное сопротивление линии – R_f	+	+	+
6	Погонная проводимость линии – G_0	+	+	+
7	Взаимная емкость связанных линий – C_m	+	+	+
8	Взаимная индуктивность связанных линий – L_m	+	+	+
9	Взаимная проводимость связанных линий – G_m	+	+	+
Электрические параметры линии связи МПП (вторичные параметры с количественной оценкой)				
10	Волновое сопротивление линии передачи на высоких частотах – Z_0	–	–	+
11	Собственная задержка линии передачи на высоких частотах – T_0	–	–	+
12	Коэффициент затухания гармонического сигнала – K_f	–	–	+
13	Коэффициент емкостной связи линий – K_C	–	–	+
14	Коэффициент индуктивной связи линий – K_L	–	–	+
Факторы, влияющие на задержку и потерю помехозащищенности				
15	Геометрические размеры линии передачи	+	+	+
16	Фронт логического сигнала	+	+	+
17	Выходной и пороговый уровни приемопередатчиков	+	+	+

18	Тип передачи (однофазная, парафазная)	+	+	+
19	Тип согласования линии (последовательное, параллельное)	+	+	+
Импульсные параметры передачи				
20	Время установления фронта логического перепада до порогового уровня приемного элемента	+	+	+
21	Динамическое уменьшение амплитуды пачки импульсов	-	-	+
22	Расширение импульсов	+	+	+
23	Разброс задержек сигналов в серийном производстве МПП	+	+	+
Использование моделей переходных процессов в линиях передач				
24	Амплитудная модель во временной области, учитывающая переходные процессы в линиях передач с потерями	-	-	+
25	Частотная модель с использованием методов Фурье	+	+	+

Данные таблицы свидетельствуют, что основные различия сопоставляемых САПР-приложений заключаются в возможностях учета вторичных электрических параметров линии связи **МПП**, а также параметров «Динамическое уменьшение амплитуды пачки импульсов» и «Амплитудная модель во временной области, учитывающая переходные процессы в линиях передач с потерями». По этим параметрам приложение **ToroR** имеет конкурентные преимущества, потенциал импортозамещения и может рассматриваться в качестве наиболее предпочтительного, с точки зрения поддерживаемо комплекса функций, для моделирования линий связи **МПП**.

Наряду с качественными сопоставительными оценками, в главе представлены результаты трассировки двух тестовых примеров с использованием трех различных САПР-приложений. Установлено, что в обоих примерах вариант топологической разводки **ToroR** имеет заметное преимущество по суммарной длине соединений, по числу межслойных переходов, а также по уровню перекрестных электромагнитных помех, который в варианте **ToroR** существенно ниже (в 3–5 раз) по сравнению с зарубежными аналогами. Установлено, что **МПП**, спроектированные с применением приложения **ToroR**, имеют почти в 10 раз лучшие показатели по электромагнитной совместимости в сравнении с результатами моделирования на базе других приложений, обладают минимизированными характеристиками влияния материала печатной платы на электрические параметры сигнальных проводников, характеризуются существенным уменьшением числа цепей с суммарной наводкой, превышающей заданные пороговые значения.

Приведенные сравнительные данные результативности практического применения являются свидетельством преимуществ разработанного с прямым участием и под руководством автора отечественного САПР-приложения TopoR, достигаемых за счет инновационной методологии топологической трассировки МПП и применения предложенной в работе технологии выбора параметров моделирования линий связи субнаносекундного диапазона для МПП высокопроизводительных вычислительных комплексов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

Диссертационная работа содержит решение актуальной научной задачи, заключающейся в усовершенствовании методологии проектирования высокопроизводительных вычислительных комплексов на основе применения разработанных методов и алгоритмов моделирования линий связи печатных плат с оптимизацией их топологических характеристик, параметров помехоустойчивости и целостности передачи логических сигналов субнаносекундного диапазона.

В процессе осуществленных в работе исследований получены следующие основные результаты и выводы.

1. Предложена концепция комплексного подхода к решению задач оптимизации электрических и конструктивных параметров линий связи высокопроизводительных вычислительных комплексов на базе применения усовершенствованной технологии моделирования переходных процессов в печатных соединениях МПП с учетом помех отражения и перекрестных помех в реальных демпфированных линиях связи и меандровых линиях задержки, а также требований к сохранению целостности сигналов.

2. Применительно к линиям связи МПП для высокопроизводительных вычислительных устройств субнаносекундного диапазона сформирован комплекс расчетных соотношений усовершенствованной технологии моделирования, описывающих процессы распространения сигнальных импульсов по длинным линиям связи с учетом специфики и полноты согласования, наличия потерь, выраженной неоднородности по длине, наличия отводов, влияния формы сечений проводников и ряда других факторов.

3. Разработан прикладной графоаналитический алгоритм описания переходных процессов при распространении сигнальных импульсов различной относительной длины в двухсекционных и четырехсекционных линиях задержки меандровой структуры с учетом факторов искажения сигналов.

4. Разработана теоретическая методика оценки частотной границы

допустимого использования приближенных моделей линий передачи при анализе цепей печатных плат и показано, что при максимально допустимом отклонении 7% верхняя граница диапазона, допускающего использование приближенных моделей линий передачи, составляет 3 ГГц.

5. Получены результаты разработки амплитудной модели по временному ряду, позволяющей описывать переходные процессы на конце согласованной линии передачи с потерями при возбуждении ее перепадами напряжений с конечной длительностью фронта и пригодной для описания реакции линии передачи на импульсы практически любой формы с использованием теоремы запаздывания.

6. Представлена разработка модели временных искажений при передаче перепада напряжения в линии связи, дающая возможность расчета времени установления переходной характеристики линии передачи до любого уровня и прогнозирования формы, амплитуды и времени установления сигналов на выходе согласованной линии передачи при возбуждении ее импульсами с конечной длительностью фронта.

7. Усовершенствован частотный метод исследования трансформаций высокочастотных импульсных сигналов в линиях связи с потерями применительно к элементам вычислительной техники в виде многослойных печатных плат, базирующийся на использовании аппарата интегральных преобразований и позволяющий решить задачу выделения аддитивных компонент (фильтрации) сигналов и синтеза сигналов, обладающих максимальной/минимальной концентрацией энергии в заданном наборе частотных интервалов.

8. Разработанные в диссертации методы, аналитические зависимости и алгоритмы усовершенствованной технологии моделирования эффективно реализованы при создании отечественного программного САПР-приложения **ToroR** для проектирования линий связи МПП с гибкой топологической структурой в компании «Эремекс» при непосредственном участии автора.

9. На основании анализа функциональных характеристик зарубежных программных приложений для автоматизированного проектирования печатных плат дана детальная характеристика приоритетных решений, обеспечивающих конкурентные преимущества и потенциал импортозамещения разработанного с использованием предложенной технологии моделирования отечественного САПР-приложения **ToroR**.

10. Полученные в работе результаты открывают возможности дальнейших инновационных исследований, связанных с предпроектным моделированием новых перспективных конструкций элементов высокопроизводительной вычислительной техники на базе использования современных отечественных САПР-приложений для моделирования линий связи многослойных печатных плат.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК РФ

1. Лобанов В.Н., Сорокин С.А., Петровский А.Б. Многометодный подход к выбору вычислительного комплекса персонального уровня // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Электронная вычислительная техника. – 2015. – Вып. 2. – С. 82 – 99.
2. Сорокин С.А., Чудинов С.М. Актуальные проблемы моделирования печатных проводников многослойной печатной платы при разработке отечественного САПР // Радиопромышленность. – 2015. – № 3. – С. 255 – 267.
3. Сорокин С.А., Чудинов С.М. Методика допускового анализа прецизионных печатных плат // Радиопромышленность. – 2015. – № 3. – С. 268 – 279.
4. Комков В.С., Сорокин С.А., Томакова Р.А., Филист С.А. Сравнительный анализ эффективности метода сегментации полутоновых растровых изображений, основанного на выборе приоритетных направлений обработки границ сегментов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РЛТ. – 2015. – Вып. 9. – С. 133 – 151.
5. Малиничев Д.М., Сорокин С.А., Чудинов С.М. Исследование и выбор параметров линий связи печатных плат вычислительных комплексов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. – 2015. – Вып. 11. – С. 7–14.
6. Малиничев Д.М., Сорокин С.А., Чудинов С.М. Выбор сечения линий связи в ЭВМ // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. – 2015. – Вып. 11. – С. 15–20.

Монография

7. Гливенко Е.В., Петрова Г.Н., Сорокин С.А. Теоретические основы построения вычислительной системы функционально-операторного типа. – М. : МИРЭА, 2016. – 142 с.

В других изданиях

8. Сорокин С.А. IBM PC в промышленности // Современные технологии автоматизации. – 1996. – № 1. – С. 6–14.
9. Сорокин С.А. Системы реального времени // Современные технологии автоматизации. – 1997. – № 2. – С. 22–30.
10. Сорокин С.А. Advantech – навстречу грядущему тысячелетию // Современные технологии автоматизации. – 1998. – № 2. – С. 82 – 88.
11. Сорокин С.А. Шина PCI в специальных приложениях // Современные технологии автоматизации. – 1998. – № 3. – С. 14–27.

12. Прикота А.В., Сорокин С.А. SimOne – отечественный симулятор электронных схем // Современная электроника. – 2015. – № 9. – С. 62–65.
13. Сорокин С.А. Ещё раз про TороR // Современная электроника. – 2016. – № 1. – С. 56–58.
14. Сорокин С.А. Колонка главного редактора // Современные технологии автоматизации. – 1996–2015. – С. 3.
15. Сорокин С.А., Чудинов С.М. Разработка комплексной технологии моделирования линий связи печатных плат высокопроизводительных вычислительных комплексов [Электронный ресурс] // Национальный Суперкомпьютерный Форум : матер. конф. – Переславль-Залесский : ИПС им. А.К. Айламазяна РАН, 2015. – Режим доступа : http://2015.nscf.ru/TesisAll/6 Apparatura/13_342_ChudinovSM.pdf.
16. Sorokin S.A. and Chudinov S.M. Electrical and Design Parameters Optimization of Transmission Lines in Computer Systems // Printed Circuit Design and Fab / Circuits Assembly. – USA : UP Media Group Inc., 2016. – Vol. 33, Issue 5. – P. 23–25.

Подписано в печать 03.06.16

Формат бумаги 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. Л. 1,0 Тираж 100. Заказ № 101
Оригинал-макет подготовлен и тиражирован в АО «НИИВК им. М.А. Карцева»,
117437, Москва, ул. Профсоюзная, 108