

На правах рукописи



Заболоцкий Александр Михайлович

**Передача импульсных сигналов
в многопроводных межсоединениях
с неоднородным диэлектрическим заполнением**

Специальность 05.13.05

Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2007

Работа выполнена в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники

Научный руководитель – канд. техн. наук старший научный сотрудник
Газизов Тальгат Рашитович

Официальные оппоненты: д-р техн. наук профессор
Чермошенцев Сергей Федорович
(Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева);

д-р техн. наук старший научный сотрудник
Сычев Александр Николаевич
(Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники)

Ведущая организация – ОАО «Научно-производственный центр «Полус»
(г. Томск)

Защита состоится 14 ноября 2007 года в 9.00 на заседании диссертационного совета Д 212.268.03 при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленин, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Автореферат разослан «10» октября 2007 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мещеряков Р.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Элементы вычислительной техники и систем управления связаны между собой межконтактными электрическими соединениями, или межсоединениями (interconnects). В настоящее время широко используются межсоединения с неоднородным диэлектрическим заполнением. Импульсные сигналы, распространяющиеся в них, можно разделить на два вида: полезные сигналы, используемые для передачи информации, и нежелательные сигналы, появившиеся в результате непреднамеренных и преднамеренных электромагнитных помех.

В межсоединениях сигналы задерживаются по времени, отражаются от неоднородностей, затухают из-за потерь, создают перекрестные наводки в соседних межсоединениях. Эти факторы и кондуктивные помехи способны существенно исказить полезные сигналы, особенно высокочастотные. Кроме того, если кондуктивная помеха появилась в результате мощного электромагнитного воздействия, то это может привести к нарушению функционирования устройства. Поэтому искажения полезных сигналов в межсоединениях и кондуктивные помехи становятся серьезной преградой к дальнейшему совершенствованию вычислительной техники и систем управления.

Состояние вопроса. В мире интенсивно исследуются явления, которые происходят в межсоединениях с неоднородным диэлектрическим заполнением, среди которых особый интерес вызывают различные полосковые линии, кабели сетевого питания и сигнальные кабели. Получены существенные результаты. Но обзор состояния исследований не позволяет говорить об их полном завершении и выявляет задачи, которые ждут своего решения. В частности, недостаточно исследованы возможности уменьшения искажений импульсных сигналов из-за различия задержек мод для уменьшения кондуктивных помех в межсоединениях с неоднородным диэлектрическим заполнением, а также возможности их использования.

Цель работы – исследование искажений импульсных сигналов в межсоединениях с неоднородным диэлектрическим заполнением и возможностей их уменьшения и использования. Для её достижения необходимо программно реализовать основные модели для вычисления временного отклика произвольных схем многопроводных линий передачи, исследовать искажения импульсного сигнала и показать возможности их уменьшения и использования.

В исследованиях использовались: компьютерное и экспериментальное моделирование, квазистатический подход, модальный анализ, метод моментов.

Достоверность результатов работы подтверждается корректным использованием проверенных математических моделей, согласованностью и совпадением результатов компьютерного и экспериментального моделирования, совпадением результатов, полученных по разным моделям и разными авторами.

Научная новизна

1. Установлено, что амплитуду дальней перекрестной помехи, при одно-временном воздействии на несколько проводников многопроводной микрополосковой линии, можно уменьшить выравниванием скоростей мод.

2. Выявлена возможность коррекции формы импульсного сигнала с помощью меандровых линий.

3. Для многопроводных межсоединений с неоднородным диэлектрическим заполнением сформулированы в аналитическом виде три условия: минимизации модальных искажений; разложения импульсного сигнала; восстановления импульсного сигнала в структуре из n отрезков.

4. Теоретически и экспериментально обоснован новый способ защиты от импульсов помех малой длительности посредством последовательного разложения импульсов в отрезках многопроводных межсоединений на большее число импульсов меньшей амплитуды.

Практическая значимость

1. Программно реализованы три модели для вычисления временного отклика произвольных схем многопроводных линий передачи.

2. Предложен способ уменьшения модальных искажений в межсоединениях печатных плат нанесением покрывающего диэлектрического слоя.

3. Предложен расчет модальной защиты, связывающий число и параметры отрезков линий передачи для разложения импульса с заданными параметрами.

4. Показана возможность модальных искажений в широко применяемых кабелях сетевого питания и сигнальных кабелях.

Использование результатов исследований

1. Реализованный модуль квазистатического вычисления отклика в составе системы компьютерного моделирования электромагнитной совместимости TALGAT использовался для оценки паразитных электромагнитных эффектов в печатных платах и в кабелях аппаратуры, разрабатываемой в НПЦ «Полус». (Фонд «Информационные технологии», Томск, 2005 г.)

2. Программные реализации моделей вычисления временного отклика в многопроводных линиях передачи применены для исследования возможностей уменьшения искажений импульсного сигнала в межсоединениях многослойной печатной платы в ходоговорной НИР «Разработка технической документации прибора для прямого видеонаблюдения состояния элементов эксплуатационных и фильтровых колонн нагнетательных и контрольных скважин полигона подземного захоронения ЖРО СХК». (Рег. ном. НИР 0120.0 509.654. ХД № 20-05, ТУСУР, Томск, 2005 г.)

3. Разработанные алгоритмы моделей для вычисления временного отклика в многопроводных линиях передачи использованы для выполнения проекта «Разработка системы компьютерного моделирования электромагнитной совместимости». (Заключительный отчет ВТК-15 по мероприятию 3.1.3а инновационной программы ТУСУР, 2006 г. и свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 8376)

4. Разработано учебно-методическое пособие, которое использовалось студентами в ходе группового проектного обучения, при выполнении курсовых работ по дисциплине «Основы электромагнитной совместимости» и дипломных работ. Разработаны 4 лабораторные работы по дисциплине «Электромагнитная совместимость и безопасность». Написана монография, которая может быть использована в качестве учебного пособия.

5. Программно-реализованные модели и исследования с их помощью составили основу работ по проекту 06-08-01242 «Исследование новых модальных явлений в структурах многопроводных линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением». (Заключительный отчет по гранту РФФИ-22, 2006 г.)

Апробация результатов. Результаты представлялись и докладывались на симпозиумах и конференциях: Межд. цюрихский симп. по ЭМС, 2006, 2007; Межд. симп. по ЭМС и электромагнитной экологии, г. Санкт-Петербург, 2005, 2007; Науч. конф. «Электрофизика материалов и установок», г. Новосибирск, 2007; Межд. молодежная науч. конф. «XII ТУПОЛЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ», г. Казань, 2004; Межд. научно-практ. конф. "Электронные средства и системы управления", г. Томск, 2004; Всерос. научно-практ. конф. "Проблемы информационной безопасности общества и личности", г. Томск, 2004, 2005, 2007; Материалы всерос. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2004–2007.

Публикации. По результатам исследований опубликована 31 научная работа: 1 монография; 7 статей в журналах из перечня ВАК; 2 доклада в трудах симпозиума дальнего зарубежья; 19 докладов и 1 тезисы в трудах отечественных симпозиумов и конференций; 1 свидетельство о регистрации программы.

Структура и объём диссертации. В состав диссертации входят введение, 5 глав, заключение, список литературы из 125 цит., 4 приложения. Объём диссертации составляет 146 стр., в том числе 71 рис. и 52 табл.

Личный вклад. Все результаты получены при личном участии автора.

Положения, выносимые на защиту

1. Алгоритмы, реализованные в работе, позволяют (в рамках квазистатического подхода) моделирование временного отклика реальных фрагментов многопроводных межсоединений.

2. При определенных соотношениях параметров меандровой линии и распространяющегося в ней импульсного сигнала появляется возможность уменьшения времени фронта сигнала за счет взаимных влияний в проводниках меандровой линии.

3. Рост числа проводников микрополосковой линии увеличивает модальные искажения.

4. Модальные явления (искажения, разложение и восстановление импульсного сигнала) в многопроводных линиях передачи характеризуются разностью задержек мод.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Передача импульсных сигналов в многопроводных межсоединениях с неоднородным диэлектрическим заполнением: Обзор

С ростом быстродействия элементной базы и увеличением плотности монтажа увеличиваются взаимовлияния в соседних межсоединениях, что искажает сигналы в них. Искажения в межсоединениях зависят от соотношения параметров сигналов, межсоединений и их окончаний.

Для оценки искажений импульсного сигнала необходим анализ временного отклика произвольных схем многопроводных межсоединений. В гл. 1 представлен обзор методов вычисления временного отклика и теоретические основы трех моделей (А. Джорджевича, Ф. Теше, М. Пакхлы).

Ориентация только на зарубежные программные продукты имеет серьезные недостатки, тогда как разработка и использование отечественных привлекательны рядом преимуществ. Поэтому собственная программная реализация моделей для их использования в системах компьютерного моделирования весьма актуальна и важна. Существенный вклад в это внесли Л.И. Бабак, Ю.П. Вацакидзе, Л.П. Кечиев, Н.А. Леонтьев, С.Ф. Чермошешев и др. В разработанной в ТУСУРе системе TALGAT реализованы вычисления матриц погонных параметров многопроводных линий передачи и оптимизация генетическими алгоритмами. Но отсутствие вычисления временного отклика не позволяет эффективную оценку искажений сигналов в межсоединениях. Вклад автора в решение данной задачи представлен в гл. 2, а в других главах показаны приложения реализованных моделей к различным практическим задачам.

Наводки в различных проводниках многопроводной микрополосковой линии с покрывающим диэлектрическим слоем исследовались Т.Р. Газизовым. Однако результаты воздействия на несколько проводников такой структуры исследованы недостаточно полно. Значительные возможности уменьшения искажений заключены в межсоединениях новой платы (Патент №2013032. Монтажная плата. Н.И. Базепков, Т.Р. Газизов. Опубл. в Б.И., 1994, №9), названной авторами помехозащищенной теплопроводной монтажной платой (ПТМП). Временной отклик одиночных и связанных межсоединений ПТМП без потерь исследован О.М. Кузнецовой-Таджибаевой. Для более адекватного моделирования необходим анализ разветвленных многопроводных межсоединений ПТМП с учетом потерь. Вклад автора в решение данной задачи представлен в гл. 3.

Важным печатным элементом являются меандровые линии задержки. Существенный вклад в их исследование внесли Р.-Б. Ву и Ф.-Л. Чао, П.А. Воробьев, Н.Д. Малютин, И.Ш. Соломоник и др. Однако ряд возможностей по их совершенствованию остается не выявленным. Вклад автора в решение данной задачи представлен в гл. 4.

Волновые процессы в различных структурах связанных линий передачи исследовали: в полосковых структурах – В.М. Краснощеркин, Г.С. Самохин, Р.А. Силин; в линиях электропередачи – М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.П. Шкарин; в СВЧ устройствах – Н.Д. Малютин, А.Н. Сычев, Э.В. Семенов. Однако искажения сигнала в активном проводнике из-за неоднородного диэлектрического заполнения многопроводных линий исследованы недостаточно. Между тем, остаются нераскрытыми дополнительные возможности их уменьшения, а также использования. Вклад автора в исследование этих вопросов представлен в гл. 5.

В конце гл. 1 сформулированы цель и задачи работы (см. с. 3).

2. Алгоритмы и программная реализация моделей

Приведены алгоритмы и выполнена программная реализация в системах MathCAD, MatLab и TALGAT трех известных моделей для вычисления временного отклика (в частотной области) произвольных схем многопроводных линий передачи. Подробно описано вычисление временного отклика в TALGAT. Корректность программной реализации моделей подтверждена сравнением с опубликованными данными и моделированием в PSpice на ряде примеров (меандровая линия; один отрезок связанных линий; два отрезка (рис. 2.1), в. т.ч. со сложными соединительными цепями; три отрезка с замкнутым контуром и Т-образным соединением). (Воздействие в форме трапеции)

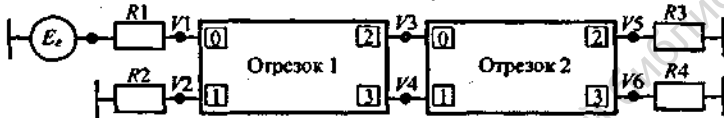
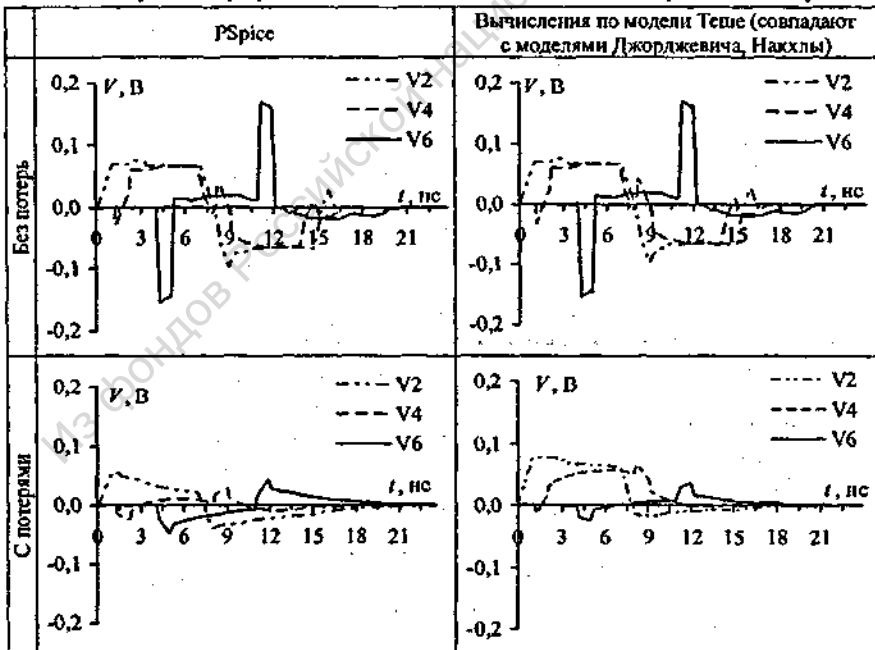


Рис. 2.1. Структура из двух последовательно соединенных отрезков

Для примера результаты моделирования в PSpice и для 3-х реализованных моделей, с учетом и без учета потерь, представлены в табл. 2.1. ($E_0=2$ В, $t_r=6$ нс, $t_f=t_r=1$ нс)

Таблица 2.1 Сравнение результатов вычисления отклика в пассивном проводнике для рис. 2.1



Для случая без потерь и с потерями полученные по 3-м моделям формы сигналов совпадают, а пиковые значения амплитуд совпадают до 3-х знаков по-

сле запятой. При сравнении с PSpice для случая без потерь формы сигнала и пиковые значения напряжений в среднем отличаются на 0,6%, а с потерями формы сигналов отличаются сильно. Это связано с тем, что в PSpice не учитываются (полагаются нулями) недиагональные элементы матриц потерь (причем, как R , так и G). Отметим, что в данном примере это приводит к занижению уровня помех ($V4$) до 2-х раз. Для меандровой линии, при сравнении результатов, полученных в TALGAT, с опубликованными данными, формы сигнала совпадают, а различие по времени и амплитуде ступенек сигнала в среднем составляет 2–3% для длины витка 5 см и 5–6% для 10 см.

Таким образом, разработанные программы позволяют корректно вычислить временной отклик фрагментов реальных межсоединений с учетом взаимовлияний проводников в рамках квазистатического подхода.

3. Уменьшение искажений импульсного сигнала в межсоединениях печатных плат

Исследована дальняя перекрестная помеха в микрополосковой линии с покрывающим диэлектрическим слоем при подключении к линии нескольких источников сигнала (рис. 3.1; $t/w=0,01$; $d/w=1$; $s/w=1$; $h_1/w=0,5$).

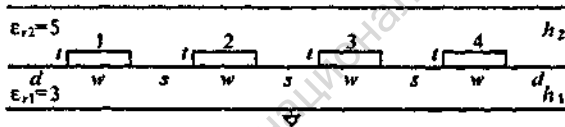


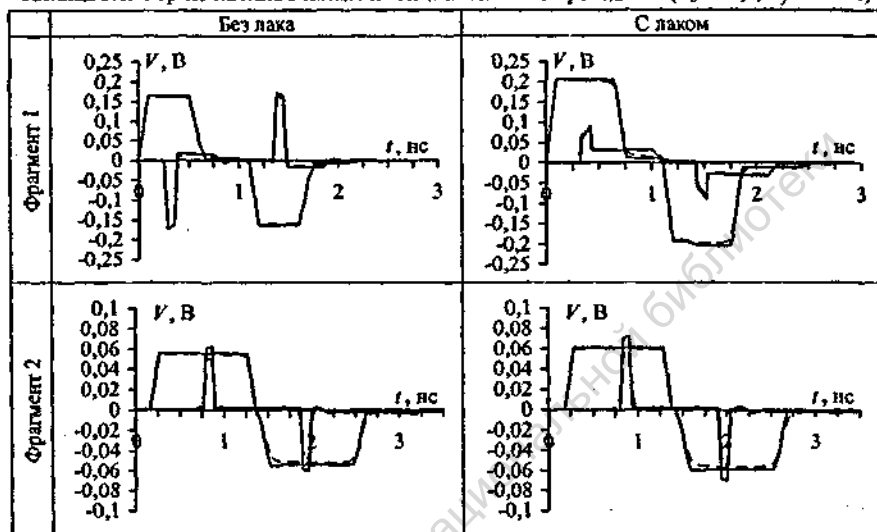
Рис. 3.1. Поперечное сечение исследуемой структуры

Рассматривалось 6 вариантов воздействия. Выявлено, что выравнивание скоростей мод за счет покрывающего диэлектрического слоя позволяет уменьшить дальнюю перекрестную помеху в 2–24 раза. Если активные проводники расположены с обеих сторон пассивного, то, амплитуда дальней перекрестной помехи достигает 60% от амплитуды входного сигнала (т.е. почти удваивается) при $h_2/w=0$, а при $h_2/w=0,4$ амплитуда уменьшается до 2,5%.

Выполнено вычисление форм сигнала в межсоединениях ПТМП с учетом потерь и их частотной зависимости. Выбрано два фрагмента. Фрагмент 1 (Ф.1): межсоединение из двух связанных подвешенных полосковых линий с шагом трассировки $w+s=0,625$ мм. Фрагмент 2 (Ф.2): наиболее длинный участок из 4-х отрезков на краю платы, которые имеют разную длину, разные поперечные сечения и шаги трассировки. Вычисленные матрицы L и C выполнялось в LINPAR и TALGAT, а матрицы R и G вычислялись в LINPAR. Отличие значений погонных коэффициентов, полученных в LINPAR и TALGAT, в среднем составляет 4%, что объяснимо различным числом сегментов. Вычисление форм сигнала в начале и в конце линий выполнялось в системе TALGAT для двух значений фронта сигнала ($t_r = t_f = 1$ нс и 100 пс) с учетом и без учета потерь и при условии псевдосогласования (т.е. сопротивления резисторов, подключенных к проводникам отрезков линий, равны соответствующим диагональным элементам матрицы характеристического импеданса). Для Ф.1 при $t_r = t_f = 1$ нс учет потерь не влияет на форму сигнала, а в Ф.2 амплитуда уменьшается на 0,2%. Для при-

мера, формы сигнала при $t_r = t_f = 100$ пс для Ф.1, 2 показаны в табл. 3.1 (сплошная линия – без потерь, пунктирная – с потерями).

Таблица 3.1. Формы сигнала в начале и конце пассивного проводника ($E_0 = 2$ В, $t_r = t_f = 100$ пс)



Для Ф.1 потери уменьшают амплитуду дальней перекрестной помехи на 5% (без лака) и 1% (с лаком), а для Ф.2 – на 16% (без лака) и 20% (с лаком). Наличие лака увеличивает амплитуду перекрестной помехи на ближнем конце для Ф.1 на 20% и Ф.2 на 9%, а на дальнем конце для Ф.1, изменив полярность (перекompенсация) уменьшает на 51%, а для Ф.2 увеличивает на 10%.

Для Ф.1 выполнено экспериментальное моделирование с помощью осциллографа универсального типа С1-91. На начало активного проводника межсоединения подавался перепад напряжения 200 ± 5 мВ, спадающий за 50 пс. Чтобы на экране осциллографа наблюдать наводку на дальнем конце пассивного проводника, к нему подключалась кабель от выхода формирователя, а к свободным концам межсоединения – нагрузки 50 Ом. На экране осциллографа наблюдалась перекрестная помеха уровнем 40 ± 1 мВ, т.е. 20% от перепада. На рис. 3.2 представлено сравнение форм напряжения: измеренной экспериментально (I) и вычисленных в системе TALGAT без учета потерь и без лака (A), с учетом потерь и без лака (B), без учета потерь и с тонким слоем (0,01 мм) триацетатной электронизоляционной слабопластифицированной пленки ТУ 6.17-499-84, которая остается на поверхности платы после прессования. При сравнении (I) и (B) видно, что амплитуды импульсов различаются на 38%, а (B) и (I) – на 17%. Таким образом, более точный учет реального диэлектрического заполнения и потерь в диэлектриках позволяет получить более близкие к экспериментальным результаты моделирования.

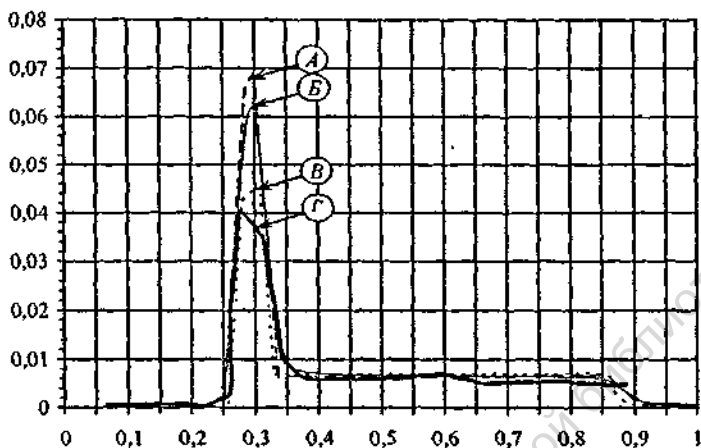


Рис. 3.2. Формы напряжения (U , нс) в конце пассивного проводника: вычисленная в TALGAT без учета потерь и без лака (А), с учетом потерь и без лака (Б), без учета потерь и с пленкой (0,01 мм) на плате (В); полученная экспериментально с пленкой (Г)

Для достижения более точного совпадения результатов эксперимента и моделирования в системе TALGAT с помощью измерительного комплекса фирмы Solatron Analytical (инструментальная погрешность 1%) измерена относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) и тангенс потерь ($\text{tg}\delta$) материалов на частоте $f_0=1$ МГц: стеклоткань (СТП-4-0,062, ТУ16-503.215-81) $\epsilon_{r1}=2,65$, $\text{tg}\delta_1=24,6 \cdot 10^{-3}$, стеклотекстолит (СТФ-2-35 ТУ 16-503.161-83) $\epsilon_{r2}=3,96$, $\text{tg}\delta_2=15,8 \cdot 10^{-3}$ и пленка триацетатная электроизоляционная слабопластифицированная (ТУ 6.17-499-84) $\epsilon_{r3}=2,95$, $\text{tg}\delta_3=22,4 \cdot 10^{-3}$. Результаты моделирования эксперимента в системе TALGAT для измеренных значений ϵ_r и $\text{tg}\delta$ представлены на рис. 3.3.

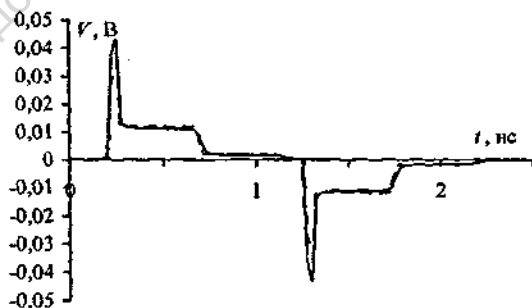


Рис. 3.3. Формы сигнала в конце структуры, вычисленные при измеренных значениях ϵ_r и $\text{tg}\delta$: без лака (—) и со слоем триацетатной пленки толщиной 0,01 мм (---)

Из рис. 3.3 следует, что амплитуда дальней перекрестной помехи для случая без лака равна 43 мВ, а с пленкой – 34 мВ, ограничивая экспериментальное значение 40 мВ. Поэтому для более точного моделирования временного отклика в многопроводных линиях передачи необходимо знать реальные значения используемых параметров материалов.

Для определения влияния лака на перекрестную помеху на межсоединение наносили слои лака УР-231. После нанесения первого слоя уровень перекрестной помехи стал 30 ± 1 мВ, а после второго – 20 ± 1 мВ. Увеличение числа слоев до 8 уменьшило уровень помехи до 10 ± 1 мВ, т.е. до 5 % от перепада. Влияние последующих слоев на уровень помехи не так существенно, как влияние первых слоев. На рис. 3.4 представлено сравнение формы напряжений, измеренной экспериментально (А) и вычисленных в системе TALGAT, при толщине слоя лака $h_2=0,17$ мм, без учета потерь (Б) и с учетом потерь (В). При сравнении (А) и (В) видно, что амплитуды импульсов различаются примерно на 11%.

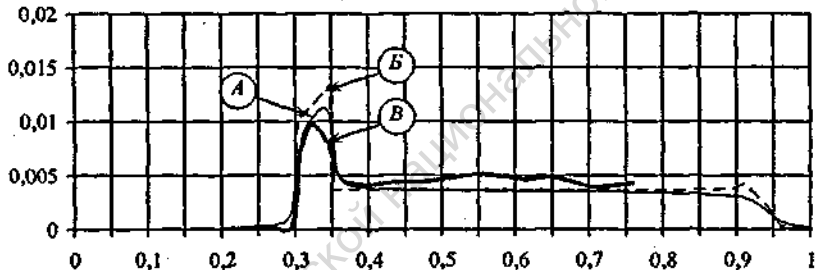


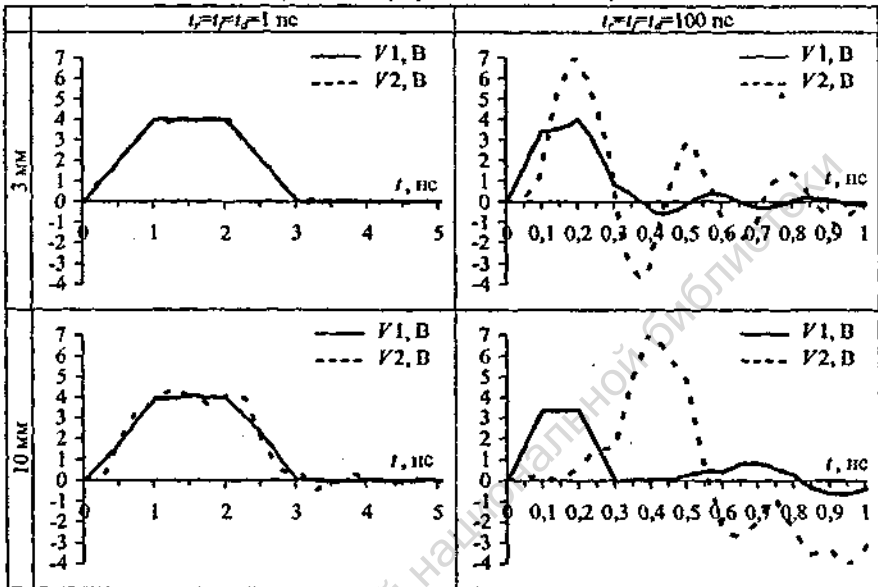
Рис. 3.4. Формы напряжения (В, нс) в конце активного проводника при $h_2=0,17$ мм: экспериментальная (А); вычисленная в TALGAT без учета потерь (Б) и с учетом потерь (В)

Результаты моделирования показали, что лак уменьшает перекрестную помеху в конце линии. Получено совпадение форм сигнала, полученных при моделировании в системе TALGAT и экспериментально.

4. Искажения импульсного сигнала в меандровых линиях задержки

Исследованы искажения импульсного сигнала в меандровых линиях (многослойной печатной платы) из одного и двух витков при различных параметрах сигнала, линий и согласования. Показано, что при псевдосогласованном случае, чтобы искажения сигнала (ступенька перед сигналом и выброс на вершине импульса) в меандровой линии из одного витка не превышали 10%, сумма коэффициентов связи (K_C+K_L) не должна превышать 0,4. Если из-за плотности монтажа ($K_C+K_L>0,4$), то для уменьшения искажений задержка сигнала в меандровой линии из одного витка должна быть меньше фронта сигнала. Аналогично исследован рассогласованный случай (низкого импеданса в начале линии и высокого – в конце). Для примера в табл. 4.1 представлены результаты моделирования для меандровой линии из двух витков.

Таблица 4.1. Формы напряжения в начале (—) и в конце (---) меандровой линии из двух витков при рассогласованном случае



Увеличение числа витков до двух не влияет на форму сигнала с $t_r = t_f = t_d = 1$ нс для псевдосогласованного случая при длине витка до 10 мм и для рассогласованного — при длине до 3 мм. Из табл. 4.1 следует, что для $t_r = t_f = t_d = 1$ нс форма сигнала не искажается при $l = 3$ мм, а при $l = 10$ мм t_r уменьшилось на 60%, а t_f — на 55%. Для $t_r = t_f = t_d = 100$ пс наблюдаются сильные искажения.

Рассмотрены меандровые линии из двух реальных фрагментов многослойной печатной платы: полтора витка и два витка с проводниками на соседнем слое (рис. 4.1).

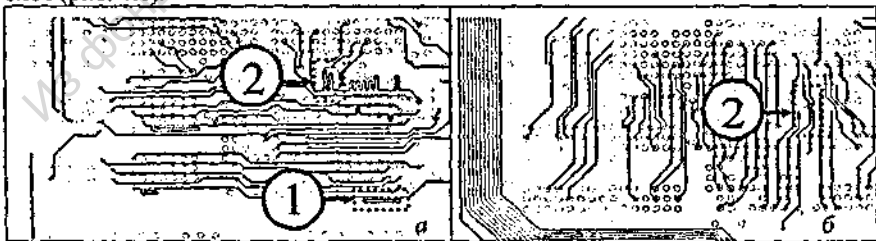


Рис. 4.1. Два рассматриваемых фрагмента на верхнем (а) и нижнем (б) слоях печатной платы

Вычисление форм сигнала выполнялось для реальных параметров сигналов и конечных цепей. Формы сигналов в меандровых линиях фрагментов 1 и 2 оказались очень схожими: для V_2 у фрагмента 1 t_r уменьшилось на

42%, t_f – на 50%, а у фрагмента 2 t_r уменьшилось на 23% и t_f – на 18% (рис. 4.2а), а амплитуда перекрестной наводки в проводниках на соседнем слое, для фрагмента 2, составила меньше 1% от амплитуды входного сигнала (рис. 4.2б).

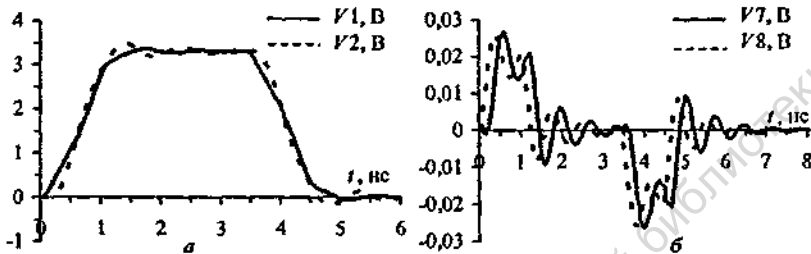


Рис. 4.2. Формы напряжения для фрагмента 1 (а) и фрагмента 2 (б)

Таким образом, при определенных соотношениях параметров сигнала и структуры взаимные влияния в проводниках могут приводить не к искажениям, а к улучшению сигнала: в рассогласованных структурах наблюдается уменьшение длительности фронта сигнала.

5. Использование модальных явлений в многопроводных межсоединениях

При распространении импульса длительностью t_d в отрезке линии, с неоднородным диэлектрическим заполнением, из N проводников (не считая опорного) импульс может подвергаться модальным искажениям, которые начинают проявляться в виде изменения фронта импульса из линейно нарастающего в ступенчатый, причём рост длины l отрезка линий увеличивает временные интервалы между ступеньками (табл. 5.1). Увеличение этих интервалов более t_d ведёт к уменьшению амплитуды импульса и его разложению на N импульсов меньшей амплитуды.

Выбором толщины покрывающего диэлектрического слоя связанных микрополосковых линий можно существенно уменьшать модальные искажения. Модальные искажения импульса в отрезке многопроводных межсоединений тем меньше, чем строже выполняется условие

$$l \{ \max(\tau_i) - \min(\tau_i) \} \ll t_r, i=1, \dots, N, \quad (5.1)$$

где l – длина отрезка, τ_i – погонная задержка i -й моды отрезка, t_r – время фронта импульса, N – число проводников в отрезке (не считая опорного). Это подтверждается данными табл. 5.2, из которой видно, что максимальная разность погонных задержек для $h_2/w=0,25$ значительно меньше, чем для $h_2/w=0$, и именно этим объясняется практически полное отсутствие искажений для $h_2/w=0,25$ (правый столбец табл. 5.1).

Таблица 5.1. Формы напряжения (В, пс)
в конце проводника 1 (рис. 3.1) при $l=2$ м, $N=2, 3, 4$, $h_2/w=0; 0,25$ для $t_d=800$ пс

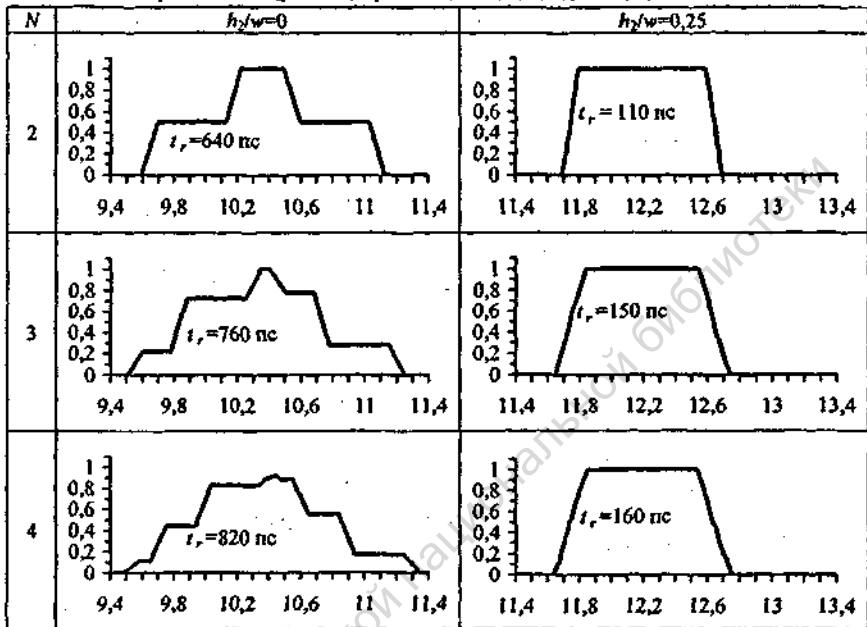


Таблица 5.2. Погонные задержки мод и их максимальная разность (пс/м)

h_2/w	$N=2$			$N=3$				$N=4$				
	τ_1	τ_2	$\max(\tau_i) - \min(\tau_i)$	τ_1	τ_2	τ_3	$\max(\tau_i) - \min(\tau_i)$	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	$\max(\tau_i) - \min(\tau_i)$
0	4799	5064	265	5131	4896	4758	373	5173	4740	4970	4826	433
0,25	5850	5843	7	5824	5871	5855	47	5818	5836	5876	5875	58

Таким образом, максимальная разность погонных задержек мод отрезка многопроводных линий является основной характеристикой, определяющей выраженность модальных искажений сигнала в этом отрезке. Поэтому важно исследовать эту характеристику подробнее. Её зависимости, для микроплосковой линии от h_2/w и для кабеля марки RJ-12 от относительной диэлектрической проницаемости оболочки кабеля (ϵ_r), показаны на рис. 5.1. Из его анализа можно сделать такие выводы:

1. Для исследованных микрополосковых линий изменение h_2/w изменяет максимальную разность погонных задержек мод, и есть оптимальное значение ($h_2/w=0,25$ для всех линий), соответствующее минимуму этой разности.

2. Рост числа проводников исследованной микрополосковой линии увеличивает максимальную разность погонных задержек мод. Этот факт может существенно влиять на модальные искажения сигнала в плотных межсоединени-

ях, например, в печатных платах или в многожильных кабелях, как это видно для RJ-12 при определенных ϵ_{r2} .

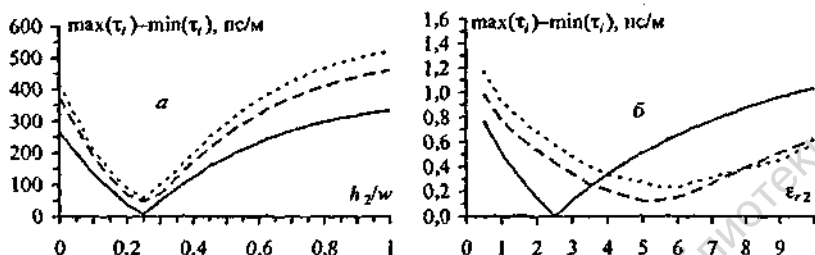


Рис. 5.1. Зависимости максимальной разности погонных задержек мод для $N=2$ (—), 3 (---), 4 (---) микрополосковой линии (а) и кабеля марки RJ-12 (б)

Для полного разложения импульса в отрезке длиной l необходимо, чтобы общая длительность импульса t_{Σ} была меньше минимального модуля разности задержек распространения мод в линии, т.е.

$$t_{\Sigma} < l \cdot \min|\tau_i - \tau_k|, \quad i, k=1, \dots, N, \quad i \neq k \quad (5.2)$$

где $\tau_{(k)}$ — погонная задержка $i(k)$ -й моды отрезка. Для $N=2$ из (5.2) получим

$$t_{\Sigma} < l \cdot |\tau_2 - \tau_1|, \quad (5.3)$$

где τ_2, τ_1 — погонные задержки чётной и нечётной мод в отрезке связанных линий. Таким образом, если в начало отрезка связанных линий между одним и общим проводниками подается импульс длительностью меньшей, чем разность задержек мод этого отрезка, то к концу отрезка (между теми же проводниками) придут 2 импульса (1 и 2 на рис. 5.2) амплитудой в 2 раза меньшей, чем в начале отрезка. (Результаты вычислены при псевдосогласовании).

Факт уменьшения вдвое амплитуды импульса может быть использован для защиты от коротких импульсов с опасно высоким напряжением в линиях передачи. Причем каскадное соединение отрезков приведет к последовательному делению каждого импульса на два импульса вдвое меньшей амплитуды (рис. 5.3). Последовательное соединение n отрезков приведет при определенных условиях к разложению на 2^n импульсов.

Для структуры из n отрезков длина k -го отрезка и общая длина структуры

$$l_k = l(2^{k-1}) \quad k=1, \dots, n, \quad (5.4)$$

$$L_n = l(2^n - 1). \quad (5.5)$$

Таким образом, формулы (5.3)–(5.5) связывают число и параметры отрезков для разложения заданного импульса, позволяя расчёт защиты.

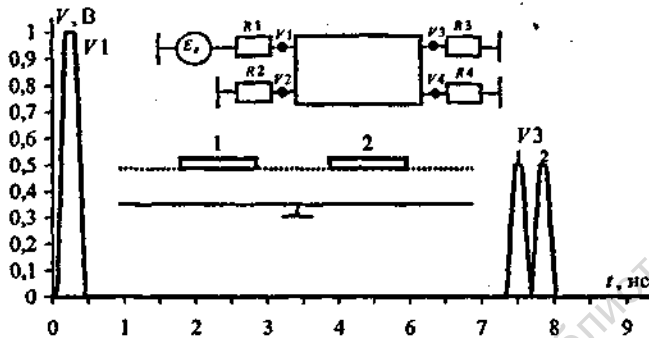


Рис. 5.2. Разложение импульса в одиночном отрезке связанной линии

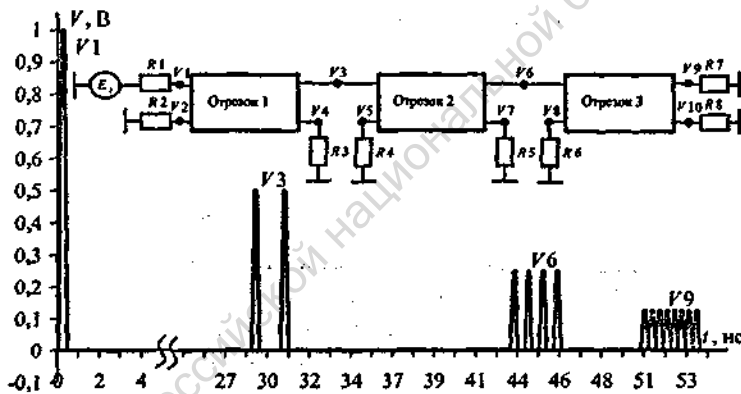


Рис. 5.3. Разложение импульса в трёх отрезках связанных линий

Практическая реализация нового принципа защиты за счет модального разложения импульса в отрезках связанных линий представляется возможной на разных структурных уровнях аппаратуры, например с помощью кабелей, в виде отдельных блоков, а также компонентов, в том числе печатных. Модальное разложение импульса рассматривалось в кабелях марки АПУНП и ТРП-3×0,5. Показано, что разложение импульса зависит от выбора опорного проводника и способа воздействия. В межсоединениях ПТМП длиной десятки сантиметров разложение может происходить для импульсов длительностью в сотни пикосекунд, а для специальной полосковой структуры – десятки наносекунд.

Пользуясь модальной теорией, для согласованного варианта при выполнении условия (5.2) амплитуды импульсов разложения можно вычислить с помощью выражения

$$V = S_V \text{diag}(V_m), V_m = \frac{1}{2} S_V^{-1} E, \quad (5.6)$$

где V — матрица размера $N \times N$, в которой значения элементов строк соответствуют амплитудам импульсов разложения в проводниках линии передачи (N — количество проводников в линии передачи); S_v — матрица размера $N \times N$, содержащая собственные векторы матрицы LC ; E — вектор размера $N \times 1$, состоящий из значений амплитуд источников напряжения.

В разводке электрических соединений аппаратуры могут быть структуры из n последовательно соединенных отрезков N -проводной линии. Рассмотрена структура из двух последовательно соединенных отрезков связанных микрополосковых линий из 2-, 3-, 4-х проводников. При моделировании отклика (рис. 5.4) параметры двух отрезков выбирались разными, но при условии, что их максимальные разности погонных задержек приблизительно равны: отрезок 1 — без диэлектрического слоя ($h_2/w=0$), а отрезок 2 — с покрывающим диэлектрическим слоем (толщиной $h_2/w=0,65$ для $N=2, 3, 4$). Проводник 1 отрезка 1 возбуждается генератором импульса э.д.с. в форме трапеции ($t_r = t_f = 100$ пс, $t_d = 200$ пс).

Видно, что исходный импульс может разлагаться на стыке двух отрезков на N импульсов гораздо меньшей амплитуды и восстанавливаться в конце отрезка 2. Если на стыке отрезков включен между сигнальным и общим проводником защитный прибор, закорачивающий цепь при превышении определённого напряжения на нём, то почти в 2 раза большее напряжение в начале структуры может оказаться на нагрузке в конце структуры, а защитный прибор не сработает. Таким образом, есть основание полагать, что указанное явление разложения и восстановления импульса может иметь место в реальных структурах и быть одной из причин отсутствия срабатывания защитных приборов. Кроме того, если злоумышленнику известны параметры отрезка 2 и он контролирует параметры отрезка 1, то он может организовать кондуктивную преднамеренную электромагнитную помеху. Поэтому важно сформулировать условия восстановления импульса.

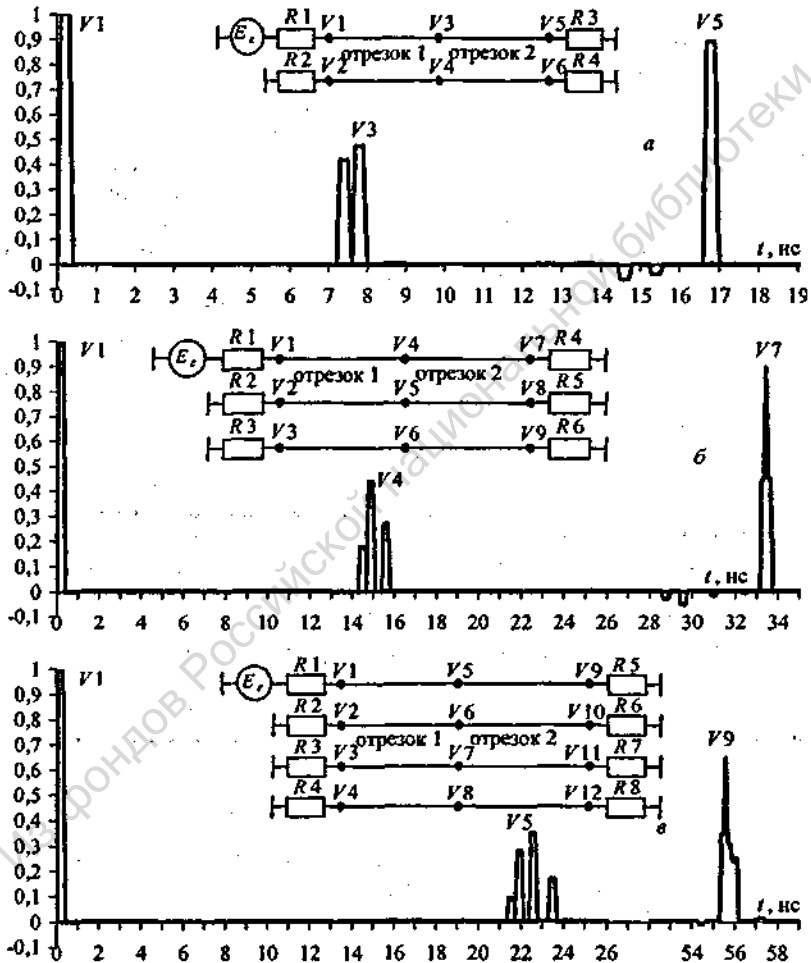
В общем случае, для n отрезков N -проводных межсоединений длиной l_j восстановление будет наиболее эффективным при одновременном приходе всех мод к концу структуры, т.е. при условии

$$\sum_{j=1}^n l_j \cdot \tau_{ij} = \sum_{j=1}^n l_j \cdot \tau_{2j} = \dots = \sum_{j=1}^n l_j \cdot \tau_{nj}, \quad (5.7)$$

где τ_{ij} — погонная задержка i -й моды j -го отрезка. Отметим, что при моделировании (рис. 5.4) длина отрезка 1 выбиралась из условия полного разложения импульса, а длина отрезка 2 подбиралась по наиболее полному восстановлению импульса в конце структуры. Подстановка длин и погонных задержек мод отрезков в условие (5.7) (табл. 5.3) и сопоставление её результатов с рис. 5.4 показывает, что, чем строже выполняется условие (5.7), тем полнее восстанавливается импульс.

Таблица 5.3. Проверка выполнения условия (5.7)

$N=2$ ($l_1=1,5$ м, $l_2=1,5$ м)		$N=3$ ($l_1=3$ м, $l_2=3$ м)			$N=4$ ($l_1=4,5$ м, $l_2=5,45$ м)			
$l_1\tau_{11}+$ $l_2\tau_{12}$	$l_1\tau_{21}+$ $l_2\tau_{22}$	$l_1\tau_{11}+$ $l_2\tau_{12}$	$l_1\tau_{21}+$ $l_2\tau_{22}$	$l_1\tau_{31}+$ $l_2\tau_{32}$	$l_1\tau_{11}+$ $l_2\tau_{12}$	$l_1\tau_{21}+$ $l_2\tau_{22}$	$l_1\tau_{31}+$ $l_2\tau_{32}$	$l_1\tau_{41}+$ $l_2\tau_{42}$
16,67 нс	16,67 нс	33,14 нс	32,22 нс	34,45 нс	56,98 нс	54,16 нс	56,87 нс	54,30 нс

Рис. 5.4. Структура и формы напряжения для $N=2$ (а), 3 (б), 4 (а)

В работе показано, что восстановление импульса происходит в широко применяемых силовых кабелях и не зависит от выбора опорного проводника.

Таким образом, в структурах из отрезков многопроводных линий передачи, например микрополосковых линий и силовых кабелей, возможно разложение

и восстановление импульса. Это явление может быть причиной отсутствия срабатывания защитных приборов на стыке таких отрезков. Оно же может использоваться и в целях электромагнитного терроризма.

Для подтверждения описанных выше модальных явлений и возможности использования плоского кабеля в качестве модального фильтра было выполнено экспериментальное моделирование с помощью осциллографа С9-11. Между парой соседних проводников кабеля подавался близкий к трапецевидному импульс с параметрами: $t_r=345,6$ нс, $t_f=276$ нс, $t_d=137,8$ нс и $E_0=1,4$ В. Осциллограммы напряжения при распространении импульса в отрезке ($l=4,8$ м) плоского кабеля ПУГНП 3×4 представлены – на рис. 5.5а, а для круглого кабеля ПВСн 3×2,5 – на рис. 5.5б. При этом на пассивном проводнике кабеля был холостой ход.

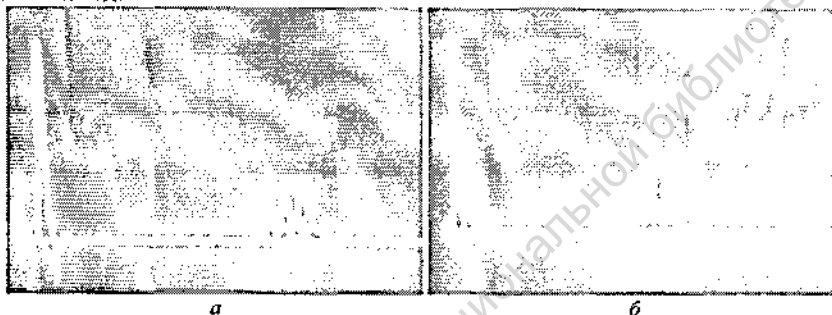


Рис. 5.5. Осциллограммы сигналов в начале (импульс слева) и в конце (импульс справа) активного проводника плоского кабеля ПУГНП 3×4 (а), и круглого кабеля ПВСн 3×2,5 (б)

Видно, что исходный импульс раскладывается в конце плоского кабеля активного проводника на два импульса с амплитудами 182 мВ и 234 мВ (различие амплитуд вызвано влиянием потерь и рассогласования). Для круглого кабеля разложение импульса в конце активного проводника не произошло, но амплитуда уменьшилась из-за потерь до 348 мВ. Результат эксперимента при распространении импульса в двух последовательно соединенных отрезках ($l_1=5$ м и $l_2=10$ м) плоского кабеля ПУГНП 3×1,5 представлен на рис. 5.6. При этом на пассивном проводнике на концах и на стыке структуры холостой ход.

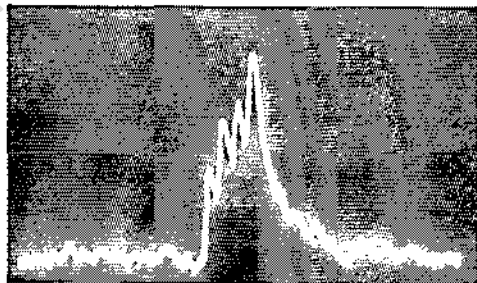


Рис. 5.6. Осциллограмма в конце активного проводника второго отрезка кабеля ПУГНП 3×1,5

Из рис. 5.6 видно разложение на четыре импульса с амплитудами: 38,5, 61,6, 70, 92,2 мВ. Очень пологий спад каждого импульса, вызванный потерями и дисперсией на большой длине кабеля, привел к значительному слиянию импульсов с последовательным ростом их амплитуды. В различие амплитуд внесло свой вклад и рассогласование из-за холостого хода в пассивном проводнике.

Экспериментальные результаты подтверждают компьютерные: в плоских кабелях возможно разложение импульса на несколько импульсов меньшей амплитуды, а в круглых кабелях разложение не происходит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы программно реализованы три известные алгоритмические модели по вычислению временного отклика произвольных схем многопроводных линий передачи с хорошими результатами тестирования (отличия от результатов, полученных другой программой, составляют в среднем 0,6%, другими авторами – 3-5%, экспериментально – 11%), что позволило в системе TALGAT выполнять сквозное моделирование, т.е. от геометрических параметров исследуемой структуры до вычисления откликов.

Приложение разработанного инструментария к проблеме межсоединений позволило получить новые результаты. Так, исследованы искажения импульсных сигналов в многопроводных межсоединениях различного типа с разными параметрами при воздействии на несколько проводников (выравнивание скоростей мод за счет покрывающего диэлектрического слоя позволило уменьшить дальнюю перекрестную помеху в 2–24 раза). Кроме того, выявлено, что при определенных соотношениях параметров сигнала и структуры взаимные влияния в проводниках меандровой линии приводят к улучшению формы сигнала (в реальных структурах меандровой линии длительность фронта импульса может уменьшаться на 18–60%). Исследованы искажения импульсного сигнала в активном проводнике многопроводного межсоединения из-за разности задержек мод, вызванной неоднородным диэлектрическим заполнением, и сформулировано аналитическое условие их уменьшения.

На основе новых модальных явлений в многопроводных межсоединениях с неоднородным диэлектрическим заполнением теоретически и экспериментально обоснован новый принцип защиты элементов вычислительной техники и систем управления на разных структурных уровнях от импульсов короткой длительности (последовательное соединение и двухпроводных отрезков приводит к разложению исходного импульса на 2^n импульсов в 2^n раз меньшей амплитуды), а также показана возможность их опасного применения в качестве кондуктивных преднамеренных электромагнитных помех.

Таким образом, в результате работы выполнено исследование искажений импульсных сигналов в многопроводных межсоединениях с неоднородным диэлектрическим заполнением, и показаны возможности уменьшения и использования искажений импульсного сигнала, так что цель диссертационной работы достигнута.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

1. Заболоцкий А.М. Моделирование прямых перекрестных помех в многопроводной микрополосковой линии при воздействии нескольких источников сигнала. Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 18–20 мая 2004 г. С. 101–105.
2. Заболоцкий А.М. Прямые перекрестные помехи в четырехпроводной микрополосковой линии при воздействии на несколько проводников. 12-е Туполевские чтения: Международная молодежная научная конференция, Казань, 10–11 ноября 2004 года: Материалы конференции. Том III. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2004. С. 156–157.
3. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Модальные искажения импульсного сигнала в многопроводной линии передачи. Материалы 6-й всероссийской научно-практической конференции «Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности», г. Томск, 2–4 июня 2004 г. С. 125–128.
4. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Кузнецова-Таджибаева О.М. Исследование модальных искажений импульсного сигнала в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением. Электромагнитные волны и электронные системы. №11, 2004 г. С. 18–22.
5. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. О возможности опасного применения модальных искажений импульсного сигнала. Материалы Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 6–8 октября 2004 г. Томск: Издательство Института оптики атмосферы СО РАН, 2004 г. С. 112–115.
6. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Разложение и восстановление импульсного сигнала в последовательно соединенных отрезках многопроводных линий передачи. Материалы 7-й всероссийской научно-практической конференции «Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности», г. Томск, 16–18 февраля 2005 г. С. 61–64.
7. Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М. Комплексная оптимизация генетическими алгоритмами для обеспечения ЭМС. Сб. науч. докл. VI Межд. Симп. по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, г. Санкт-Петербург, 21–24 июня 2005 г. С. 160–164.
8. Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М. Компьютерное моделирование сложных структур проводников при проектировании телевизионно-вычислительных систем. Известия вузов. Приборостроение. 2005 г., №10. С. 63–66.
9. Тимук В.Н., Заболоцкий А.М. Система компьютерного моделирования отклика произвольных схем многопроводных линий передачи. Материалы научно-технической конференции студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2005», г. Томск, 26–28 апреля 2005 г. С. 143–146.

10. Ковалькова К.В., Заболоцкий А.М. Исследование искажений импульсных сигналов в сложных межсоединениях помехозащищённой теплопроводной монтажной платы. Там же. С. 115–118.
11. Филипов Е. В., Заболоцкий А. М. Программная реализация и исследование методов вычисления временного отклика произвольных схем многопроводных линий передачи. Там же. С. 93–94.
12. Zabolotsky A.M., Gazizov T.R., Bova A.G., Radasky W.A. Dangerous pulse excitation of coupled lines. Proc. of the 17-th Int. Zurich Symp. on EMC. Singapore, February 27–March 3, 2006, pp. 164–167.
13. Заболоцкий А.М., Бова А.Г. Вычисление максимальной разности погонных задержек мод в многопроводных кабелях. Материалы научно-технической конференции студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2006», Томск, 4–7 мая 2006 г. С. 101–103.
14. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Искажения импульсного сигнала в простых меандровых линиях. Инфокоммуникационные технологии. Том 4. №3. 2006 г. С. 34–38.
15. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Разложение и восстановление импульса в линиях передачи. Электромагнитные волны и электронные системы. №11. 2006 г. С. 4–7.
16. Газизов Т.Р., Кузнецова-Гаджибаева О.М., Заболоцкий А.М. Уменьшение дальней перекрестной помехи в печатных платах нанесением лака. Технологии ЭМС. №4. 2006 г. С. 36–39.
17. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов. Технологии ЭМС. №4. 2006 г. С. 40–44.
18. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. О влиянии диэлектрического заполнения и электрофизических параметров многопроводных линий передачи на предельную скорость передачи сигналов. Научная конференция «Электрофизика материалов и установок», г. Новосибирск, 2007 г. С. 69–74.
19. Заболоцкий А.М., Горин Е.Н., Бевзенко И.Г., Газизов Т.Р. Вычисление максимальной разности погонных задержек мод в кабелях ТРП-3×0,5 и RJ-12 для контроля модальных явлений. Материалы 9-й всероссийской научно-практической конференции "Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности", г. Томск, 15 февраля 2007 г. С. 19–22.
20. Газизов Т.Р., Кузнецова-Гаджибаева О.М., Заболоцкий А.М. Интегрированная защита и возможность ее реализации в помехозащищенных теплопроводных монтажных платах. Там же. С. 23–26.
21. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Модальное зондирование – новый принцип зондирования многопроводных структур. Там же. С. 27–30.
22. Заболоцкий А.М., Орлов П.Е., Газизов Т.Р. Вычисление разности погонных задержек мод в трехпроводной структуре с одной диэлектрической границей для реализации технологии модального зондирования. Там же. С. 30–34.

23. Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г. Модальные искажения импульсного сигнала в кабеле марки ТРП-3×0,5. Материалы научно-технической конференции студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2007», г. Томск, 3–7 мая 2007. С. 105–108.
24. Заболоцкий А.М., Горин Е.Н. Модальные искажения импульсного сигнала в кабеле марки RJ-12. Там же. С. 109–112.
25. Заболоцкий А.М., Орлов П.Е. Моделирование временного отклика трехпроводной структуры с одной диэлектрической границей для реализации технологии модального зондирования. Там же. С. 87–90.
26. Заболоцкий А.М., Каташов А.Н. Моделирование реальных фрагментов печатных плат в системе TALGAT. Там же. С. 95–99.
27. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 8376 от 24.05.2007 г. «Система компьютерного моделирования сложных структур проводников и диэлектриков TALGAT» (Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., Костарев И.С.), зарегистрированной в Отраслевом фонде алгоритмов и программ Госкорпорации Минобрнауки РФ с присвоенным номером государственной регистрации - рег. номер ВНИИЦ 50200701103.
28. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Горин Е.Н., Бевзенко И.Г. Возможности применения новых модальных явлений в целях электромагнитного терроризма и для защиты от него. Труды VII Межд. Симп. по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, г. Санкт-Петербург, 26–29 июня 2007 г. С. 266–269.
29. Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. New approach to EMC protection. Proc. of the 18-th Int. Zurich Symp. on EMC. Munich, Germany, September 24–28, 2007. P. 273–276.
30. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Исследование искажений импульсного сигнала в меандровых линиях печатных плат // Вестник КГТУ им. А.И. Туполева. №3. 2007 – С. 21–24.
31. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Временной отклик многопроводных линий передачи. – Томск: Томский государственный университет, 2007. – 152 с.

2007 А
2018Р

Р 2 0 1 8 8

Из фондов Российской национальной библиотеки

Тираж 100. Заказ № 1290.
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40