

НА ДОЛ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

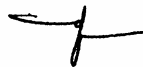
На правах рукописи

Чермошенцев Сергей Федорович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ
ПЛАТ ЦИФРОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ**

Специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования
05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва 2005

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор
Норенков Игорь Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Кечиев Леонид Николаевич
доктор технических наук,
профессор
Овчинников Владимир Анатольевич
член-корреспондент РАН
Рябов Геннадий Георгиевич

Ведущая организация: Институт проблем проектирования в
микроэлектронике РАН

Защита диссертации состоится 14 апреля 2005 г. в 14³⁰ часов
на заседании специализированного Совета Д212.141.10 при Московском
государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу:
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ
им. Н. Э. Баумана.

Ваш отзыв на автореферат диссертации, заверенный печатью, просим
выслать по указанному адресу.

Автореферат разослан “___” _____ 2005 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета,
кандидат технических наук, доцент



С. Р. Иванов

Сек. в конфе

115



1708715

Чермошенцев С.Ф. Автоматиз

1. Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Современное общественное производство характеризуется все более широким внедрением цифровых электронных средств во все отрасли хозяйства. В свою очередь, магистральным направлением развития цифровых электронных средств (ЭС) является совершенствование элементной базы и цифровых узлов в отношении таких показателей, как степень интеграции, быстродействие, электромагнитная совместимость (ЭМС), надежность. Достижения в данном направлении способствуют созданию новых поколений высокопроизводительных цифровых ЭС.

Автоматизация проектирования служит важным фактором сокращения сроков и повышения качества проектирования, снижения удельного веса экспериментальных исследований. Системы автоматизированного проектирования (САПР) применяются на всех этапах и уровнях проектирования цифровых ЭС. В связи с этим важное значение приобретает проблема развития математического и программного обеспечения САПР. В значительной мере это относится к этапу конструкторского проектирования печатных плат цифровых ЭС и, в частности, к прогнозированию модулей на ЭМС, оптимизации ЭМС межсоединений печатных плат, компоновке схем ЭС по модулям, размещению элементов на печатных платах и трассировке межсоединений.

Неуклонное увеличение быстродействия и степени интеграции элементной базы обуславливает изменение методов проектирования и конструирования цифровых ЭС, учет "новых" требований по ЭМС, ужесточение требований к электрическим параметрам межсоединений и помехоустойчивости элементов, что, несомненно, требует разработки более совершенных математических моделей, основанных на принципах анализа электромагнитных процессов и теории электромагнитного поля.

При разработке цифровых ЭС важная роль отводится исследованию паразитных электромагнитных процессов в печатных платах и оценке их влияния на быстродействие и ЭМС устройств. В условиях "новых" требований ЭМС по учету распределенных паразитных электромагнитных эффектов в печатных платах и росту плотности компоновки цифровых узлов необходимо существенное расширение пределов сложности исследуемых объектов на основе повышения эффективности решения задач анализа и оптимизации ЭМС, компоновки, размещения и трассировки по таким показателям, как качество проектных решений, затраты машинного времени и памяти.

В решение проблемы обеспечения ЭМС ЭС внесли большой вклад советские и российские ученые и специалисты: Волин М. Л., Вуль В. А., Газизов Т. Р., Гурвич И. С., Ибатуллин Э. А., Кармашев В. С., Кечиев Л. Н.,

Кириллов В. Ю., Князев А. Д., Наумов Ю. Е., Носов В. В., Петров Б. В., Степанов П. В., Файзулаев Б. Н., Чурин Ю. А. и др.; среди зарубежных ученых известны своими работами в данном направлении К. Армстронг, Дж. Барнс, Р. Миттра, Г. Отт, Д. Уайт, Т. Уилльямс, Э. Хабигер, Р. Харрингтон, А. Шваб.

Однако, несмотря на достаточно широкое освещение проблемы ЭМС ЭС и, в частности, печатных плат для них, большинство работ не отвечает требованиям настоящего времени по следующим основным причинам: отсутствуют модели для анализа ЭМС печатных плат со сверхбыстродействующей элементной базой; не решены задачи оптимизации ЭМС межсоединений печатных плат; не разработаны алгоритмы для трассировки межсоединений печатных плат, размещения элементов на платах и компоновки схем ЭС по модулям, учитывающие критерий ЭМС.

Проблемы теории автоматизированного проектирования и создания САПР ЭС носят междисциплинарный характер. В исследование этих проблем значительный вклад внесли следующие учёные и специалисты: Абraitис Л. Б., Вишнеков А. В., Зайцева Ж. Н., Норенков И. П., Овчинников В. А., Петренко А. И., Рябов Г. Г., Селютин В. А. и др. Результаты в области разработки генетических и эволюционных алгоритмов представлены в работах Батищева Д. И., Коровкина Н. В., Курейчика В. М. и др.

Цель работы и задачи исследований

Целью работы является решение важной научно-технической проблемы – разработка, исследование и применение технологии автоматизированного проектирования печатных плат с учетом критерия электромагнитной совместимости на этапе конструкторского проектирования цифровых ЭС для обеспечения их ЭМС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать методы анализа электромагнитных процессов в межсоединениях печатных плат.
2. Разработать универсальные и объектно-ориентированные математические модели межсоединений печатных плат для анализа задержек сигналов, их искажений, отражений и перекрестных помех.
3. Исследовать и разработать подходы снижения размерности задачи анализа внутриаппаратурной ЭМС печатных плат на основе учета функционально-логических и конструктивно-топологических особенностей межсоединений.
4. Разработать математические модели шин земли/питания печатных плат для анализа импульсных помех.
5. Разработать математические модели для учета влияния статического

электричества и внешнего электромагнитного поля на межсоединения печатных плат.

6. Исследовать математические модели для анализа электромагнитного излучения от межсоединений печатных плат.

7. Разработать процедуры внутриаппаратурной и многокритериальной оптимизации ЭМС межсоединений печатных плат.

8. Разработать модели, стратегии и алгоритм для трассировки межсоединений печатных плат с учетом обеспечения критерия ЭМС.

9. Разработать алгоритмы размещения элементов на печатной плате и компоновки схем по модулям, учитывающие критерий ЭМС.

10. Разработать прикладное программное обеспечение для задач анализа и оптимизации ЭМС межсоединений печатных плат, трассировки межсоединений, размещения элементов и компоновки схем.

Основные методы исследований

При решении поставленных задач использовались методы конечных и граничных элементов, методы теории электромагнитного поля и анализа электромагнитных процессов, методы и средства обеспечения электромагнитной совместимости, методы теории построения экспертных систем, элементы теоретических основ САПР и генетические алгоритмы.

Научная новизна

К основным научным результатам, которые получены лично автором, включены в диссертацию и представляются к защите, относятся:

1. Технология автоматизированного проектирования печатных плат цифровых ЭС с учетом критерия ЭМС.

2. Математические модели для анализа:

- электрических параметров (емкостей, индуктивностей) межсоединений печатных плат;
- задержек сигналов, их искажений, отражений и перекрестных помех в печатных платах, в том числе универсальные модели с внутренним итерированием;
- импульсных помех на шине земли (питания) многослойных печатных плат;
- влияния статического электричества на цифровые элементы печатных плат;
- влияния внешнего электромагнитного поля на межсоединения многослойных печатных плат;
- электромагнитного излучения от межсоединений печатных плат.

3. Сравнительные результаты по исследованию методов анализа электромагнитных процессов в межсоединениях печатных плат.

4. Экспертная стратегия фрагментации межсоединений печатных плат и

подход к поиску наиболее неблагоприятных сочетаний входных сигналов фрагментов межсоединений печатных плат, приводящих к перекрестным помехам наибольшей величины.

5. Постановка и решение задач оптимизации внутриаппаратурной и многокритериальной ЭМС межсоединений печатных плат на основе генетических алгоритмов.

6. Модели, стратегии и алгоритм для проектирования межсоединений печатных плат, учитывающие критерий ЭМС.

7. Алгоритмы для размещения элементов на печатной плате и для многокритериальной компоновки схем ЭС по модулям, учитывающие критерий ЭМС.

Материалы, представленные в диссертации, характеризуются общей направленностью разработок. Они содержат совокупность новых научных обобщений и отвечают тенденциям современного развития теории и практики автоматизированного проектирования и обеспечения электромагнитной совместимости цифровых электронных средств.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, представленных в работе, подтверждается согласованностью результатов с известными подходами, опубликованными в отечественной и зарубежной литературе, обоснованным выбором методов исследований, адекватностью математических моделей, результатами экспериментальной проверки моделей, методов и программного обеспечения.

Достоверность результатов подтверждается практикой внедрения основных результатов диссертационных исследований на ряде предприятий.

Практическая ценность

На основе полученных в работе результатов внедрена в практику технология автоматизированного проектирования печатных плат цифровых ЭС, учитывающая критерий ЭМС. Использование данной технологии позволяет значительно улучшать характеристики ЭМС печатных плат цифровых ЭС.

Результаты диссертационной работы внедрены в интегрированную САПР предприятия и использованы в реальном проектировании печатных плат цифровых ЭС на 4 предприятиях, а также используются в учебном процессе в 2 технических университетах, что подтверждается документами о внедрении.

Результаты исследований использованы в методическом обеспечении дисциплины “Информационные технологии ЭМС электронно-вычислительных средств” по специальности 2205 “Проектирование и технология электронно-вычислительных средств” КГТУ им. А. Н. Туполева.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7 Международных, 6 Всесоюзных, 10 Российских и 11 иных симпозиумах, конференциях и семинарах. В том числе на III, IV и V Международных симпозиумах “Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология” (Санкт-Петербург, 1997; 2001; 2003); Международном семинаре “Искусственный интеллект в образовании” (Казань, 1996); Международной научно-технической конференции “Проектирование и эксплуатация электронных средств” (Таганрог, 2000); Международном семинаре “Использование новых информационных технологий в учебном процессе” (Ульяновск, 1997); Международной научно-практической конференции “Информационные технологии в образовании, управлении и промышленности” (Комсомольск-на-Амуре, 1996); Всесоюзной научно-технической конференции “Методы и средства борьбы с помехами в цифровой технике” (Вильнюс, 1986; 1990); Всесоюзной школе-семинаре “Разработка и внедрение в народное хозяйство ЕС ЭВМ” (Тбилиси, 1987; Киев, 1989); Всесоюзном научно-техническом семинаре “Автоматизированное проектирование оптико-электронных приборов” (Москва, 1987); Всесоюзной научно-технической конференции “Электромагнитная совместимость судовых технических средств” (Новороссийск, 1990); IV, V и VI Российских научно-технических конференциях “Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов” (Санкт-Петербург, 1996; 1998; 2000); VII Российской научно-технической конференции “Электромагнитная совместимость” (Санкт-Петербург, 2002); VIII Российской научно-технической конференции “Электромагнитная совместимость технических средств и электромагнитная безопасность” (Санкт-Петербург, 2004); Всероссийском симпозиуме “Проблемы электромагнитной совместимости технических средств” (Москва, 2002); I Всероссийской научно-технической конференции “Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве” (Нижний Новгород, 1999) и др.

Реализация исследований и предложения об использовании

Результаты диссертационной работы внедрены и нашли практическое использование на ряде предприятий и организаций, занимающихся проектной, производственной и образовательной деятельностью, что подтверждается актами внедрения.

Разработанные в диссертационной работе научные положения, технология, модели, алгоритмы, процедуры и программы могут быть полезны специалистам, занимающимся автоматизированным проектированием печатных плат цифровых ЭС, интегральных схем и интеллектуальных зданий, а также для специалистов в области

электромагнитной совместимости и безопасности.

По разработанному в диссертации направлению под научным руководством соискателя защищены 1 кандидатская и 14 магистерских диссертаций, подготовлена к защите 1 кандидатская диссертация, работают 5 аспирантов, 3 соискателя и 3 магистранта.

Публикации

Основные научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 90 печатных работах, в том числе в 3 книжных изданиях, 19 статьях (из них 12 статей в изданиях, рекомендованных ВАК), 36 научных докладах, 27 тезисах докладов, 1 авторском свидетельстве и 4 методических руководствах (см. перечень публикаций в конце автореферата).

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа выполнена на 474 страницах, содержит 330 страниц основного текста, 166 рисунков и 29 таблиц, список литературы из 434 наименований.

II. Основное содержание работы

Введение

Во введении обоснована актуальность проблемы электромагнитной совместимости печатных плат цифровых ЭС. Формулируется цель работы и защищаемые научные положения, описывается структура диссертации и ее краткое содержание по главам.

Глава 1. Задачи анализа электромагнитной совместимости печатных плат цифровых электронных средств

Закон Российской Федерации “О техническом регулировании” и Технический регламент “Об электромагнитной совместимости” определяют электромагнитную совместимость технических средств как “способность технических средств функционировать удовлетворительно в их электромагнитной обстановке, не создавая недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам”. Поэтому техническое средство считается совместимым, если оно в качестве передатчика является источником помех не выше допустимых, а в качестве приемника обладает допустимой чувствительностью к посторонним влияниям, т.е. достаточной помехоустойчивостью или иммунитетом. Проблема ЭМС возникает, как правило, прежде всего, у приемников, если нарушается безупречный прием полезного сигнала, например, случайно поступившей электромагнитной энергией нарушено или сделано совсем невозможным нормальное

функционирование системы.

Проектирование межсоединений нано- и субнаносекундных ЭС характеризуется рядом особенностей:

1) значительное повышение быстродействия, увеличение плотности размещения межсоединений на конструктивах, снижение уровней логических перепадов при уменьшении времени переключения схем и повышение чувствительности элементов к электромагнитным помехам;

2) значительную часть площади на конструктивных модулях 1-го и 2-го уровня занимают межсоединения, например, в сверхбольших интегральных схемах (СБИС) до 80-95%;

3) возможности физической реализации межсоединений опережают возможности выполнения испытаний устройств, в том числе на ЭМС;

4) использование СБИС и многослойных печатных плат (МПП) со СБИС не позволяет конструктору наблюдать пути прохождения сигнала на физической реализации машины и, как показал опыт, все пути сигналов (короткие и длинные) являются потенциально критическими;

5) задаче качественного проектирования помехоустойчивых конструктивов подчинены этапы компоновки и размещения элементов на модулях;

6) невозможно изменять топологию изготовленных конструктивов и, следовательно, устранять опасные ситуации в опытном образце устройства;

7) существенно увеличиваются стоимость и сроки разработки ЭС, если анализ ЭМС не проводился, начиная со стадии проектирования;

8) экспериментальные исследования ЭМС модулей на СБИС представляют значительные трудности и требуют разработки новых методов и принципов измерений.

Таким образом, особенно остро проблема ЭМС межсоединений ЭС и помехоустойчивости элементов возникает при проектировании межсоединений СБИС и печатных плат со СБИС. В этом случае рассматривают в основном следующие типы электромагнитных помех:

1) задержки сигналов и искажения их формы при распространении по межсоединениям;

2) отражения сигналов в межсоединениях от несогласованных нагрузок и неоднородностей;

3) перекрестные помехи между сигнальными межсоединениями;

4) помехи по цепям питания и заземления;

5) электростатический разряд;

6) наводки от внешних электромагнитных полей;

7) электромагнитное излучение;

8) СВЧ – помехи.

При анализе электромагнитных процессов в межсоединениях ЭС обычно различают электрически “короткие” и электрически “длинные” линии связи. Классификация эта основана на соотношении между задержкой сигнала в

линии t_3 и длительностью фронта импульса $t_{фр}$. При $t_{фр} \gg t_3$ межсоединения определяют как электрически “короткие” с сосредоточенными параметрами, а $t_3 \gg t_{фр}$ рассматривают как “длинные” линии с распределенными параметрами. Однако чаще для оценки электрической длины пользуются более конкретными соотношениями: если выполняется условие

$$2t_3 \geq (0,3-0,4)t_{фр}, \quad (1)$$

то линия электрически “длинная”. В противном случае линия электрически “короткая”. Соотношение (1) выполняется для межсоединений, размещенных в слоях металлизации СБИС и в линиях связи печатных плат.

Маршрут проектирования модулей ЭС на основе печатных плат представлен на рис. 1.



Рис. 1. Маршрут проектирования модулей ЭС

В работе приведены сведения о 35 известных системах анализа ЭМС ЭС, САПР, подсистемах САПР, пакетах прикладных программ и отдельных программах, позволяющих пользователю проводить полный или частичный

анализ ЭМС различных конструктивов ЭС. Изложены основные задачи перечисленных систем анализа ЭМС ЭС.

На основании сравнения возможностей и особенностей систем анализа ЭМС ЭС следует, что анализ ЭМС конструктивов наносекундных цифровых ЭС сложно проводить существующими системами в связи с их низкой экономичностью и точностью решений, обусловленными большим числом схемных уравнений. Кроме того, отсутствуют эффективные методы формализованного и автоматизированного выбора межсоединений для анализа, позволяющие существенно снизить размерность задачи анализа ЭМС ЭС.

Проведенный анализ состояния проблемы позволяет сформулировать цель и задачи диссертации. Цель настоящей работы – разработка и исследование технологии автоматизированного проектирования печатных плат цифровых ЭС с учетом критерия ЭМС.

Глава 2. Моделирование внутриаппаратурной электромагнитной совместимости печатных плат цифровых электронных средств

Задача анализа электрических параметров межсоединений печатных плат является составной частью проблемы ЭМС. Принципиальные возможности методов анализа электрических параметров межсоединений, а также точностные характеристики этих методов предопределяют достоверность и точность анализа ЭМС. Кроме того, используемые методы должны удовлетворять требованию эффективности при реализации в САПР.

При определении электрических параметров межсоединений печатных плат наибольшую сложность представляет расчет собственных и взаимных емкостей и индуктивностей. Известные аналитические методы и выражения на их основе применимы для определения собственных и взаимных емкостей межсоединений, расположенных в однородных структурах, содержащих 2-3 проводника. Применение экспериментальных методик затруднено из-за незначительных размеров межсоединений.

Анализ методов непосредственного определения емкостей (метод средних потенциалов, метод площадок, эквивалентных зарядов, вспомогательные методы и т.д.) и методов на основе расчета электростатических полей структур печатных плат (метод конечных разностей, конечных и граничных элементов) показал, что наиболее приемлемым подходом является применение метода конечных элементов. В этом случае электростатическое поле структуры печатной платы описывается уравнением Пуассона при заданных граничных условиях Дирихле. По известному распределению скалярного потенциала поля вычисляется заряд каждого межсоединения, отыскиваются собственные и взаимные емкости проводников.

При анализе полей печатных плат зачастую возникают размерности

моделей $10^3 \dots 10^5$ узлов (уравнений), которые обусловлены требуемой точностью. В связи с этим в работе разработан пакет программ на языке программирования *Fortran* на основе метода конечных элементов, содержащий модели плоских и объемных линейных и билинейных элементов, в том числе бесконечных элементов. Применение бесконечных элементов в анализе открытых структур печатных плат позволяет снижать количество узлов в конечно-элементной модели до 70%.

В данной работе предложено для решения систем линейных алгебраических уравнений конечно-элементных моделей структур печатных плат применение итерационного метода Гаусса-Зейделя в сочетании с алгоритмом квадратичной сходимости (выигрыш по машинным затратам свыше 10 раз), используемым в области устойчивой сходимости решения (после 5...8 подряд сходящихся итераций).

Сравнительный анализ результатов определения электрических параметров (емкостей, индуктивностей) межсоединений для ряда тестовых структур печатных плат по аналитическим выражениям и методом конечных элементов показал, что относительная погрешность расчетов методом конечных элементов не превышает $\pm 5\%$.

Решение уравнений Максвелла во временной области позволяет исследовать электромагнитные процессы в печатных платах. Однако это решение оказывается довольно сложным даже для простейших структур и трудноосуществимым на высокопроизводительных ЭВМ. Поэтому обычно прибегают к определенным приближениям, следующим из особенностей структур и существенно упрощающим анализ: 1) межсоединения конструктива кусочно-однородны по длине. На концах нагружены элементами, представляющими произвольные цепи. Если вдоль линии имеются неоднородности, то межсоединение можно разбить на ряд однородных участков, а влияние неоднородностей учесть, вводя соответствующие эквивалентные цепи; 2) в линиях связи печатных плат распространяются квази-ТЕМ-волны.

С учетом этих особенностей межсоединения печатной платы можно описать системой дифференциальных уравнений в частных производных во временной области и системой обыкновенных дифференциальных уравнений в частотной области (телеграфными уравнениями). Существует несколько методов решения подобных уравнений: методы нормальных волн в частотной и временной области, метод функций Грина, метод пошагового продвижения во времени (табл. 1).

В данной работе разработаны программы на языке *Pascal* в среде программирования *Delphi* 5.0, реализующие соответственно метод нормальных волн во временной и частотной областях, а также метод продвижения во времени. Проведено сравнительное моделирование задержек сигналов, их искажений, отражений и перекрестных помех для ряда структур печатных плат данными методами. Для трех методов

установлен линейный характер зависимостей временных затрат ЭВМ на моделирование от длины межсоединения. Показано, что наиболее подходящим методом, позволяющим анализировать межсоединения с потерями и без потерь, с нелинейными и произвольными нагрузками, в реальном временном масштабе и за приемлемое машинное время является метод пошагового продвижения во времени.

Таблица 1

Методы анализа электромагнитных процессов

№ п/п	Метод	Недостатки
1	Метод нормальных волн во временной области (система ДУ – дифференциальных уравнений в частных производных)	Межсоединения только без потерь и однородные по длине
2	Метод нормальных волн в частотной области (система ОДУ – обыкновенных дифференциальных уравнений)	Только линейные нагружающие цепи и инвариантные во времени
3	Метод функций Грина (системы ОДУ и ДУ в частных производных)	Большие затраты машинных ресурсов, длительность отклика межсоединений превышает несколько периодов прохождения сигнала
4	Метод продвижения во времени (система ДУ в частных производных)	Сложные эквивалентные цепи для частотно-зависимых параметров межсоединений

Для реализации метода пошагового продвижения во времени в работе разработаны эффективные компонентные модели межсоединений *LC*-, *RC*- и *RLC*-типа, позволяющие учитывать распределенные паразитные электромагнитные эффекты в проводниках при анализе задержек сигналов, их искажений, отражений и перекрестных помех. Предложены универсальные модели межсоединений, описывающие проводники различных длин. В моделях межсоединений можно учитывать влияние потерь в проводнике и (или) диэлектрике структуры печатной платы.

Для анализа перекрестных помех во фрагментах межсоединений разработаны модели для участков паразитного электромагнитного взаимодействия нескольких параллельных линий, например, 2, 5, 8. Внутри модели реализуется взаимодействие, описываемое телеграфными уравнениями во временной области. При анализе сложных фрагментов межсоединений возможно последовательное и параллельное соединение моделей, а для простых фрагментов – заземление лишних активных линий.

Модели являются двунаправленными и позволяют исследовать варианты согласного и встречного включения межсоединений. Данные модели реализованы в программном комплексе (ПК) ПА-9.

По результатам вычислительных экспериментов установлено условие оптимальной (точность – машинные затраты) дискретизации межсоединений: время задержки сигнала на одном звене межсоединения должно быть в 8-12 раз меньше длительности минимального фронта сигнала среди переднего и заднего. Приемлемая погрешность моделирования электромагнитных процессов в $\pm 3\%$ достижима при указанном ранее условии дискретизации межсоединения и начальном шаге интегрирования, равном 0,01-0,1 от времени прохождения сигнала в одном звене модели.

Результаты анализа задержек сигналов и перекрестных помех (по амплитуде помехи) в межсоединениях печатных плат на ПК ПА-9 согласуются с экспериментальными данными соответственно с погрешностью $\pm 7\%$ и $\pm 12\%$.

В результате моделирования внутриаппаратурной ЭМС межсоединений печатных плат различной сложности установлено, что анализ фрагментов межсоединений, включающих 40-50 проводников достаточно большой электрической длины, приводит к чрезмерным затратам машинного времени, а моделирование более сложных фрагментов возможно лишь при использовании методов, снижающих размерности задач анализа ЭМС.

В настоящей работе предложен формализованный подход к фрагментации межсоединений печатных плат на основе применения теории экспертных систем, т.е. экспертной стратегии, в выделении наиболее критических фрагментов межсоединений в общей топологии платы с целью последующего анализа на ЭМС.

Система на основе экспертной стратегии по оценке перекрестных помех и задержек сигналов в межсоединениях печатных плат разработана для ускоренного прогнозирования помех (задержек) на этапе проектирования плат по принципу “учета топологической разреженности межсоединений”. Система способна давать три типа “советов”: оценку топологии печатных плат на предмет выделения помехоопасных фрагментов проводников, оценку степени помехоопасности и определение наиболее критических межсоединений в уже выделенном фрагменте. Перед выполнением фрагментации межсоединений необходимо провести следующие процедуры: 1) выбор правил-кандидатов; 2) определение взаимных и собственных электрических параметров межсоединений для правил-кандидатов; 3) тест-анализ или моделирование электромагнитных процессов для каждого правила-кандидата. На основе тест-анализа формируется база знаний системы. В правилах системы учтена конкретная элементная база, согласное и встречное включение межсоединений, коэффициент нагрузки и т.д.

Проведенные численные эксперименты по поиску критических фрагментов проводников в печатных платах цифровых ЭС сложностью

10^2 - 10^4 межсоединений показали, что предложенный подход на основе экспертной стратегии дает сокращение вычислительных затрат на 1-3 порядка в сравнении с полным анализом межсоединений печатных плат методом продвижения во времени на ПК ПА-9, но с погрешностью 10-30%.

В данной работе с целью дальнейшего снижения размерности задачи анализа ЭМС предложен подход по учету "временной разреженности" фрагментов межсоединений печатных плат цифровых ЭС или поиску наиболее неблагоприятных сочетаний входных сигналов, приводящих к перекрестным помехам наибольшей величины, основанный на базе единого входного языка Пролог. В универсальной программе в виде совокупности фактов описываются таблицы истинности всех типов логических элементов, которые входят в фрагмент печатной платы. Фрагмент описывается в виде правила, устанавливающего отношение между переменными на выходе и входах фрагмента. Решение (входной набор сигналов), приводящее к помехе наибольшей амплитуды в конкретном проводнике, может быть получено с помощью многошагового процесса, в котором каждый шаг соответствует новому сочетанию значений искомого вектора. При согласовании последовательности описания фактов и логических элементов в правиле со стратегией поиска решения, реализованной в интерпретаторах Пролога, возможно отыскание входного набора сигналов всего за несколько шагов.

На основе данного подхода проводился поиск возможных входных наборов сигналов для фрагментов схем ЭС различной сложности (от 20 до 2500 элементов) и для различных состояний выхода на ЭВМ *Pentium II* 200 МГц. Время расчета на одном шаге составляло до 100 с при количестве оцененных подцелей до 23000 за указанное время. Адаптация программы к решаемой задаче осуществляется не только выбором формы описания исходных данных в виде фактов или правил, но и выбором последовательности перечисления фактов в базе данных и конъюнкций в теле правила.

В работе моделируются импульсные помехи в проводящем слое земли МПП с помощью уравнения вида:

$$\nabla^2 U(x, y, t) = (RC + L\Theta) \times \partial U(x, y, t) / \partial t, \quad (2)$$

где U – потенциал в слое земли МПП; R , C , L , Θ – соответственно сопротивление, емкость, индуктивность и проводимость единичного квадрата слоя земли; при соответствующих зависящих от времени граничных условиях следующих двух типов:

$\partial U / \partial n = 0$, $U = U_0$ на Gr_1 и $\partial U / \partial n = q_0$, $U = 0$ на Gr_2 в момент времени 0

и $\partial U / \partial n = 0$, $U = U_i$ на Gr_1 и $\partial U / \partial n = q_0$, $U = 0$ на Gr_2 в момент времени t ,

где Gr_1 и Gr_2 – части границы, на которых задается то или иное условие. Полная граница рассматриваемой области будет $Gr = Gr_1 \cup Gr_2$. Некоторые начальные значения в области исследования Ω в момент времени $t=0$: $U(0)=0$.

Решение уравнения (2) осуществляется методом граничных элементов. Для этого была разработана программа MGE на языке программирования C++. В качестве примеров приводилось моделирование импульсных помех на шинах земли МПП при различном количестве элементов на границе.

Предложенная математическая модель для анализа импульсных помех (потенциалов) на шинах земли (питания) МПП и ее программная реализация позволяют оценивать уровни данных помех в различных конструктивных исполнениях МПП, отличающихся видом слоя земли (сплошная, сетка и решетка) и величинами электрических параметров R , C , L , θ . Результаты анализа импульсных помех по величине амплитуды согласуются с известными экспериментальными данными с погрешностью $\pm 12\%$.

Глава 3. Электромагнитное взаимодействие печатных плат цифровых электронных средств с окружающей средой

При применении многих материалов, имеющих низкую электропроводность, протекают процессы электризации, в результате которых на поверхности взаимодействующих друг с другом тел накапливаются униполярные электрические заряды (положительные, отрицательные) – статическое электричество (СЭ). Вызывающие опасные воздействия заряды СЭ возникают различными путями, но в печатных платах существенны два механизма поляризации: за счет трения и индукции. Само по себе существование в неподвижном состоянии СЭ редко создает проблемы ЭМС, однако проблемы возникают при быстром разряде между заряженными телами, во время которого появляются импульсы тока с временем нарастания в нано- или субнаносекундном диапазоне. При импульсном разряде СЭ в виде искры возникают переходные напряжения и токи, связанные с быстро изменяющимися электростатическими и магнитными полями, которые не только вызывают функциональные помехи, например, в виде ложного срабатывания элемента, но и могут вызвать разрушение элементов и поэтому, несомненно, полезно проводить анализ возможного влияния СЭ на элементы печатных плат именно на этапе проектирования.

В работе рассматриваются два случая воздействия СЭ: 1) тело разряжается на выводы, корпус интегральной схемы или на межсоединение в печатной плате; 2) косвенное влияние обусловлено паразитным потекосцеплением между контурами печатной платы и контурами (стенка корпуса), образованными при разрядах СЭ.

В данной работе предлагаются математические модели (источников разряда СЭ, межсоединений, элементов, корпуса) для анализа влияния (непосредственное, косвенное) СЭ на элементы печатных плат, реализованные в ПК ПА-9. Приводятся результаты моделирования (осциллограммы помех, графики зависимостей амплитуд наведенных помех)

для различных источников влияния (человек, малая мебель и т.д.) при непосредственном и косвенном воздействии СЭ на печатные платы с ТТЛ-, ЭСЛ- и КМОП-элементами, а также их сравнение с известными экспериментальными данными (погрешность $\pm 22\%$ по амплитуде помехи).

По полученным в данной работе результатам можно судить: 1) об областях работоспособности ЭСЛ, ТТЛ и КМОП цифровых элементов при непосредственном и косвенном воздействии СЭ и соответственно еще на этапе проектирования исключать возможные потенциально опасные межсоединения в печатных платах; 2) помехозащищенности конструкций и топологий печатных плат; 3) эффективности корпусов ЭС при влиянии СЭ.

Важнейшим вопросом ЭМС при проектировании печатных плат ЭС является обеспечение их работоспособности в условиях воздействия электромагнитных полей как на цифровой узел в целом, так и на отдельные межсоединения и элементы. Влияние внешнего электромагнитного поля определяется его взаимодействием с межсоединениями всего ЭС, в котором происходит преобразование поля в паразитные напряжения и токи, зависящие от характеристик внешнего электромагнитного поля; эффективности экранирования ЭС; конструктивного исполнения модуля; топологии и степени экранирования межсоединений; элементной базы.

Основными разновидностями внешнего электромагнитного поля являются электромагнитные импульсы двух видов: трапецеидальный и экспоненциальный (импульс ядерного взрыва). Приводятся методы защиты ЭС и печатных плат: структурно-функциональные; схемотехнические; конструктивные. Рассматриваются понятия "противофазные и синфазные помехи". Формулируются правила рационального конструирования межсоединений. Использование данных правил при конструировании печатных плат наталкивается на некоторые трудности, обусловленные особенностями конструкции модуля; многофакторностью при проектировании системы заземления; отсутствием сведений о распределении внешних электромагнитных полей вне и внутри модуля и т. д.

В данной работе предлагаются математические модели и их программные реализации для анализа влияния внешнего электромагнитного поля на межсоединения печатной платы. В частности, для исследования экранирующих свойств МПП или определения отраженного (прошедшего) от потенциального слоя (сетка прямоугольная, ромбическая и т. д.) электромагнитного поля применяется метод усредненных граничных условий. Следует отметить ограничения, которые допускались при выводе граничных условий для любых видов сетчатых структур:

$$a, b \gg r_{\text{эф}}; a, b \ll \lambda,$$

где a, b – периоды сетки в двух взаимно перпендикулярных направлениях; $r_{\text{эф}}$ – эффективный радиус сечения проводника сетки; λ – длина волны, соответствующая частоте электромагнитной помехи в среде.

Вывод формул для коэффициентов отражения и прохождения основан на

определении отраженной и прошедшей компонент поля с помощью граничных условий, выведенных для конкретной структуры сетки. При этом такая характеристика, как значение напряжённости электрической составляющей поля, оказывается не определяющей, так как вышеуказанные коэффициенты по своей сути являются относительными. Зато важными становятся такие параметры поля, как его частота, поляризация, угол падения и т.д. Среди параметров сетчатой структуры, влияющих на коэффициенты отражения и прохождения, можно назвать следующие: вид сетки; диэлектрическая и магнитная проницаемость среды и платы; размеры и форма сечения проводника сетки; удельная электрическая проводимость материала сетки. В моделях реализованы варианты параллельной и перпендикулярной ТЕ-поляризаций внешнего электромагнитного поля для случая произвольного угла падения и нескольких сеточных слоев печатной платы. В данной работе приводятся результаты анализа экранирующих свойств МПП в виде диаграмм коэффициентов отражения и прохождения от частоты n -й гармоники электромагнитного импульса трапецидальной (экспоненциальной) формы при различных углах падения относительно нормали к плоскости платы и параметров сеточной структуры.

Для анализа напряжений (токов) в конкретном межсоединении печатной платы, наведенных от внешнего электромагнитного поля, применяется учет компонент поля в виде распределенных источников напряжения и тока. Следовательно, новые телеграфные уравнения, в отличие от классических уравнений, включают изменение магнитного потока и компонент E_x , E_y электрического поля через площадь контура, образованного сигнальным межсоединением и шиной земли.

Для автоматизированного прогнозирования восприимчивости межсоединений МПП к внешним электромагнитным помехам по данным математическим моделям была разработана программа *Vosprim*. Программа реализована в среде *Delphi 5.0* на языке объектно-ориентированного программирования *Visual Pascal*. Приводятся результаты моделирования напряжений и токов на проводниках МПП при воздействии внешнего электромагнитного импульса (трапецидального, экспоненциального). Проверка адекватности математических моделей, реализованных в программе *Vosprim*, проводилась на основании сравнения с известными результатами эксперимента и показала, что относительная погрешность составляет не более $\pm 25\%$ по амплитуде помехи.

Проблема электромагнитного излучения (ЭМИ) от ЭС известна специалистам, прежде всего, с момента распространения персональных компьютеров. ЭМИ, генерируемые ЭС или их компонентами, обусловлены протеканием дифференциальных и синфазных токов. В цифровых узлах на основе печатных плат излучаемое электромагнитное поле образуется при синхронном протекании дифференциальных токов в контурах двух типов:

- 1) контур, сформированный проводниками печатной платы или шинами

питания, по которым на элемент подается питание; 2) контур, образованный при передаче логических сигналов по межсоединению от одного элемента к другому с использованием в качестве обратного провода шины земли. Также возникновение ЭМИ может быть обусловлено некоторыми особенностями в структуре межсоединений: изменение сечения проводника; изгиб и т.д.

В настоящее время в проблеме ЭМИ принято выделять три аспекта: биологическая ЭМС, защита информации, конструктивная ЭМС. Данные аспекты появляются не на всех конструктивных уровнях ЭС (табл. 2) и возникли не одновременно, а постепенно: первым появился аспект ЭМС, затем – биоЭМС, а затем – защита информации.

Таблица 2

Уровни и аспекты ЭМИ

Уровень	Условное изображение	Элементы, его образующие	Аспекты
1		Элемент, межсоединение на печатной плате	1) ЭМС, 2) защита информации
2		Печатная плата, соединение между печатными платами	1) ЭМС, 2) защита информации
3		Устройство	1) ЭМС, 2) защита информации, 3) биоЭМС
4		Помещение	1) ЭМС, 2) защита информации, 3) биоЭМС

Численные методы анализа ЭМИ нацелены на непосредственное решение фундаментальных уравнений поля с граничными условиями, обусловленными геометрией задачи и самой задачей. Проводится сравнение нескольких основных методов: метода конечных разностей во временной области; метода матрицы линии передач (TLM метода); метода конечных и граничных элементов; метода моментов. Рассматриваются основные характеристики данных методов по требуемой памяти ЭВМ, времени счета, универсальности метода и предварительной аналитической работе.

В данной работе для анализа ЭМИ от межсоединений печатных плат ЭС в поле ближней зоны предлагается математическая модель на основе решения интеграла Зоммерфельда, т.е. интегрального представления для

электромагнитных полей, вызванных горизонтальными и вертикальными диполями Герца. Печатный проводник представляется суперпозицией герцевских диполей. Герцевский диполь, в свою очередь, представляется суперпозицией собственных функций. Приводятся выражения для вычисления компонент вектора Герца для x - и y -диполей, а для их вычисления применяется метод седловой точки. По значениям компонент вектора Герца вычисляется напряженность электрического поля в точке наблюдения.

Для анализа ЭМИ от межсоединений (контуров) печатной платы по данной математической модели была разработана программа *Izluch* (программа реализована в среде *Delphi 5.0* на языке объектно-ориентированного программирования *Visual Pascal*), использовавшаяся для сравнительного исследования ЭМИ от межсоединений на печатной плате в зависимости от частоты и величины тока гармонического сигнала, величины диэлектрической проницаемости и толщины платы, длины межсоединения и площади контура. Также проводится сравнение последних результатов с результатами, полученными по вспомогательной модели (модель не учитывает механизм возвратного проводника и толщину диэлектрического основания платы).

Результаты анализа ЭМИ от межсоединений печатных плат аналитическим методом (на основе представления проводника совокупностью диполей Герца) согласуются с погрешностью $\pm 10\%$ с экспериментом; $\pm 15\%$ с методом конечных элементов; $\pm 20\%$ с методом моментов.

Глава 4. Оптимизация электромагнитной совместимости межсоединений печатных плат цифровых электронных средств

Введение жестких международных и Российских стандартов в области ЭМС в последние годы привело к увеличению заинтересованности производителей ЭС в оптимизации своей продукции с точки зрения ЭМС, прежде чем проводить соответствующие испытания, для того чтобы снизить затраты времени на маркетинговые исследования, анализ себестоимости и проектирование. С другой стороны, с увеличением скоростей передачи сигналов в цифровых системах эффект влияния межсоединений становится доминирующим фактором, ограничивающим эксплуатационные показатели цифрового узла. Эффект влияния межсоединений в цифровых системах существует на нескольких уровнях, например, печатная плата, многокристальный модуль и т.д. Оптимизация достаточно большой сети межсоединений с распределенными параметрами, учитывающая критерий ЭМС и большое число проектных параметров линий передач, является сложной задачей.

Постановка задачи оптимизации ЭМС межсоединений печатных плат

цифровых ЭС достаточно специфична. В большинстве случаев решение задачи должно быть получено на множестве решений уравнений Максвелла или телеграфных уравнений. Поэтому каждое решение задачи оптимизации достаточно трудоемкая процедура, требующая многократного анализа ЭМС межсоединений печатной платы во временной (частотной) области. С другой стороны, постановка этой задачи содержательна только при достаточно большом числе (несколько десятков) проектных параметров. При этом основные трудности численного решения экстремальной задачи связаны с её размерностью и видом оптимизируемой функции, которая в общем случае может быть нелинейной, разрывной, недифференцируемой и многоэкстремальной.

Классические поисковые методы оптимизации: требуют дифференцируемости функции качества и информации о ее производных; позволяют на каждой итерации определять лишь единственное решение; имеют неэффективное продвижение к глобальному экстремуму в задачах с большим числом локальных экстремумов и проектных параметров; имеют проблему выбора начального приближения; требуют изменения стратегии поиска решения при оптимизации многоэкстремальных функций и т.д. Указанные недостатки отсутствуют у методов оптимизации, построенных на основе генетических алгоритмов.

Генетический алгоритм – это оптимизационный эвристический алгоритм, основанный на принципах естественной генетики, и мощная стратегия выходов из локальных оптимумов, заключающаяся в параллельной обработке множества альтернативных решений с концентрацией поиска на наиболее перспективных из них. Анализ результатов использования генетических алгоритмов позволяет выделить следующие условия, при выполнении которых задача решается эффективно: большое пространство поиска, ландшафт которого является негладким; сложно формализуемая функция степени оценки качества решения; многокритериальность поиска; большое число проектных параметров и т.д.

В данной работе предлагается оптимизация внутриаппаратной ЭМС межсоединений печатных плат цифровых ЭС генетическими алгоритмами.

Пусть Φ – вектор проектных параметров включает в себя ширину проводника, расстояние до слоя земли, длину проводника, расстояние до соседнего проводника и т.д. Число физико-геометрических параметров для многопроводной линии гораздо меньше числа её электрических параметров, поэтому эффективная оптимизация ЭМС межсоединений строится через изменение геометрических параметров проводников. Обозначим $V(\Phi, j)$ – отклик в точке j межсоединения в момент времени t ; J_1 – список, содержащий все точки цепи, в которых существует требуемый сигнал; J_2 – список, содержащий все точки цепи, в которых сигнал отсутствует. Другими словами, если точка $j \in J_1$, то точка находится на пути распространения полезного сигнала, а в случае $j \in J_2$, точка лежит вне пути

распространения сигнала. Задача оптимизации заключается в том, чтобы найти минимум задержки распространения сигнала в межсоединении $\tau_j(\Phi, t)$ при $j \in J_1$ и минимум амплитуды перекрестной помехи $V_j(\Phi, t)$ при $j \in J_2$ в области допустимых значений вектора проектных параметров Φ и момент времени t , $0 < t < \infty$.

Принцип работы генетического алгоритма состоит в следующем. Вначале формируется множество потенциальных решений (гипотез), которое представляет собой начальную популяцию. В большинстве случаев это множество формируется случайно. После того как создана начальная популяция, выполняем процедуры скрещивания, мутации, вычисление функций пригодности (произведение задержки сигнала и перекрестной помехи), создание новой популяции и т.д.

Целью исследуемых в работе примеров является решение типичных задач оптимизации внутриаппаратурной ЭМС межсоединений цифровых печатных плат генетическими алгоритмами. Данные алгоритмы реализованы программно в среде *Delphi 5.0* и ПК ПА-9. Результаты, полученные генетическими алгоритмами, в целом соответствуют решению данных примеров минимаксным методом (функция качества – функция ошибок), но было достигнуто улучшение по задержкам сигналов, их искажениям, отражениям и перекрестным помехам.

Формулировка задачи многокритериальной оптимизации ЭМС межсоединений цифровых печатных плат отличается от формулировки задачи оптимизации внутриаппаратурной ЭМС, т.к. требуется оптимизация по нескольким критериям (целям) и учет влияния статического электричества, внешних электромагнитных помех и электромагнитного излучения (табл. 3). Последние факторы предлагается объединить в единый обобщенный критерий – площадь контура S , образованного сигнальным проводником на плате и шиной земли.

Таблица 3

Функции пригодности и типы электромагнитных помех

Функция пригодности	Целевая функция	Тип электромагнитной помехи	Размерность функции
F_{np1}	τ_j	Задержка сигнала, искажение и отражение	с
F_{np2}	V_j	Перекрестная помеха	В
F_{np3}	S	Электростатический разряд, наводка от внешних электромагнитных полей, электромагнитное излучение	мм ²

В данной работе предлагается многокритериальная оптимизация ЭМС межсоединений печатных плат цифровых ЭС генетическими алгоритмами.

Для решения задач многокритериальной оптимизации применяется многопараметрический генетический алгоритм (рис. 2), который в целом состоит из генетического алгоритма и лица, принимающего решение (ЛПР). ЛПР в каждой популяции (или через несколько поколений) принимает решение относительно количества хромосом, переходящих в следующее поколение из числа хромосом, имеющих лучшее значение функции пригодности, соответствующее конкретному критерию.

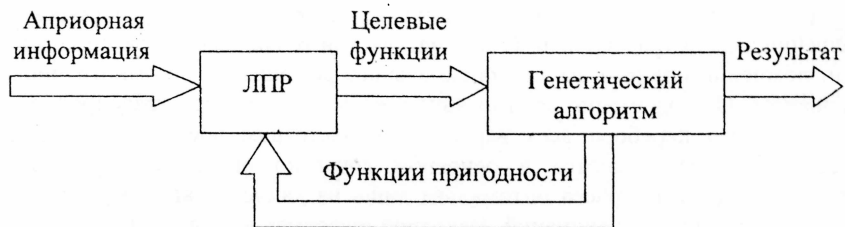


Рис. 2. Многопараметрический генетический алгоритм

Целью исследуемых в работе примеров является решение типичных задач многокритериальной оптимизации ЭМС межсоединений цифровых печатных плат многопараметрическими генетическими алгоритмами. Данные алгоритмы реализованы программно в среде *Delphi 5.0* и ПК ПА-9. Результаты многокритериальной (одноразмерные и разноразмерные критерии) оптимизации ЭМС межсоединений цифровых печатных плат многопараметрическим генетическим алгоритмом в целом соответствуют результатам, полученным другими методами (градиентным, минимаксным), но было достигнуто значительное улучшение по задержкам сигналов, их искажениям, отражениям, перекрестным помехам, влиянию статического электричества и внешних электромагнитных помех, электромагнитному излучению.

При начале оптимизации ЭМС межсоединений цифровых печатных плат генетическими и многопараметрическими алгоритмами из разных начальных точек значения вектора проектных параметров получались практически одинаковыми (погрешность до 1%), функции пригодности значительно изменяются (убывают, возрастают) за первые несколько поколений эволюционного процесса, данные алгоритмы дают качественно лучшие решения, чем другие методы, при числе проектных параметров от 6 до 46.

Глава 5. Проектирование печатных плат цифровых электронных средств с учетом критерия электромагнитной совместимости

В данной главе обобщаются рекомендации по обеспечению ЭМС цифровых печатных плат и принципы их учета в качестве критерия при

автоматизированном проектировании печатных плат на этапах трассировки межсоединений, размещения элементов на плате и компоновки схем ЭС по модулям.

Проектирование межсоединений цифровых печатных плат, иначе трассировка межсоединений, является одной из наиболее трудных задач в общей проблеме автоматизации проектирования ЭС. Прежде всего, это связано с многообразием способов конструктивно-технологической реализации соединений, каждый из которых обуславливает использование специфических критериев оптимизации и ограничений при алгоритмическом решении задачи трассировки. С математической точки зрения трассировка – наисложнейшая задача выбора оптимального решения из огромного числа вариантов. Одновременно оптимизация всех соединений при трассировке за счет полного перебора всех вариантов в настоящее время невозможна. Поэтому разрабатываются в основном локально оптимальные методы трассировки, когда трасса оптимальна лишь на данном шаге при наличии ранее проведенных соединений. Исходной информацией для решения задач трассировки межсоединений являются список цепей, параметры конструкции элементов и коммутационного поля, а также данные по размещению элементов.

Существует два различных типа требований к трассировщикам МПП: общие и особые. Эффективный алгоритм трассировщика МПП для высокоскоростных цифровых узлов должен удовлетворять следующим общим требованиям: минимизация задержек сигналов, их искажений и отражений; минимизация перекрестных помех между сигнальными проводниками; учет влияния скин-эффекта в межсоединениях. Кроме вышеперечисленных требований предлагается ряд особых требований к трассировке МПП: уравнивание задержек сигналов для групп проводников и межсоединений различных направлений; создание минимальных изгибов проводников; контроль числа межслойных переходов; назначение слоев, ограниченных максимальным числом межслойных переходов, разрешенных для цепи; регулировка длин проводников и задержек сигналов для соответствия границам синхронизации; выбор нужного межслойного перехода на базе смены слоя или используемой технологии; принятие избранных или приоритетных направлений по заданным слоям; минимизация влияния статического электричества на межсоединения и элементы МПП; минимизация влияния внешнего электромагнитного поля на межсоединения МПП; минимизация электромагнитного излучения от межсоединений МПП; легкая расширяемость алгоритма трассировки по мере замены технологии изготовления МПП. Большинство вышеперечисленных общих и особых требований к трассировщикам МПП учтено при разработке технологии автоматизированного проектирования печатных плат цифровых ЭС.

В работе предлагается алгоритм построения пути заданной длины в

неориентированном графе, учитывающий требования ЭМС, предъявляемые к межсоединениям. Пусть задан граф-решетка $G(V, E)$, моделирующий коммутационное поле печатной платы; V – множество вершин (узлов решетки); E – множество ребер. Необходимо между заданными вершинами a и b ($a, b \in V$) найти путь $p(a, b)$ с длиной, минимально отличающейся от заданного значения:

$$\min |L - |p(a, b)||, \text{ где } L > 0.$$

Решение данной задачи сводим к поиску пути минимальной стоимости в графе решений $H(U, T)$, получающемуся при просмотре исходного графа $G(V, E)$ от начальной вершины $a \in V$. В предложенном алгоритме различного рода запреты и неоднородности коммутационного поля легко учитываются в его структуре смежности. При трассировке МПП применяется алгоритм многослойной трассировки Хейса, являющийся обобщением алгоритма Ли и позволяющий осуществлять построение межсоединений в пространстве.

Предлагаемая модель однослойной трассировки работает следующим образом. В каждом сигнальном слое сначала определяют последовательность трассировки межсоединений, основываясь на линейной комбинации оценок загруженности поля трассировки, длины цепей и их приоритета. Затем находится путь трассировки межсоединения, являющийся последовательностью ячеек для каждой цепи, в обход “перегруженных” участков. Иногда дополнительно применяется алгоритм сжатия прямоугольника после проведения трассировки межсоединений. Цель данного алгоритма сжатия прямоугольника – это утилизировать неиспользованное пространство, оставшееся после трассировки, чтобы уменьшить размер ограничивающего прямоугольника для каждой цепи, не прошедшей трассировку.

Применяются две разновидности моделей для трассировки плоскостной пары: 1) XU -фиксированная модель. В каждой плоскостной паре один слой разрешает только соединения в направлении X , а другой слой разрешает только соединения в направлении Y ; 2) XU -свободная модель. На каждом слое оба направления X и Y для проводников разрешены.

Для объединения различных требований по ЭМС межсоединений на этапе трассировки МПП предлагается учитывать: задержки сигналов, их искажения и отражения на основе результатов предварительного анализа электромагнитных процессов в типовых фрагментах межсоединений МПП (см. главу 2) и рекомендаций по метрическому ограничению на участки длин проводников; перекрестные помехи на основе предварительного анализа типовых фрагментов межсоединений, состоящих из нескольких (2–5) параллельных проводников в одном сигнальном слое (см. главу 2), и рекомендаций по топологическому размещению проводников; влияние разряда статического электричества, внешних электромагнитных полей и электромагнитного излучения на основе минимизации площадей контуров,

образованных сигнальными межсоединениями и соответствующими им шинами земли.

В работе предлагается программа *TRAS* (исследовательский вариант) для проектирования межсоединений МПП. Программа *TRAS* реализована в среде объектно-ориентированного программирования *Delphi 3.0* на языке высокого уровня *Object Pascal*. Программа содержит следующие блоки: предварительной обработки исходной информации; установки очередности трассировки межсоединений; распространения волны; проведения пути; формирования выходной информации и т.д. Сигнальные слои МПП в программе *TRAS* рассматриваются попарно, а впоследствии проводится общая интеграция попарно протрассированных слоёв с учетом шин земли/питания и экранирующих слоев.

Для проверки эффективности программы трассировки МПП *TRAS*, стратегии и моделей, соответствующих ей, была выполнена трассировка межсоединений 12 практических примеров МПП, отличающихся размерами плат; проектным числом сигнальных слоев (4...12); количеством контактов. Результаты проектирования МПП по различным стратегиям трассировки при соответствующих параметрах, таких как общая длина межсоединений, число слоев платы, число сквозных или ступенчатых межслойных переходов, задержка сигналов в межсоединениях и площадь контуров межсоединений платы приведены на рис. 3. В качестве функции распределения используется отношение действительного значения параметра платы (длины межсоединений l и т.д.) к оценке нижней границы данного параметра. Стратегии трассировки МПП применялись следующие: стратегия 1: ОТ + ХУ-фиксированная со сжатием; стратегия 2: ОТ + ХУ-фиксированная; стратегия 3: ОТ + ХУ-свободная со сжатием; стратегия 4: ОТ + ХУ-свободная; стратегия 5: ОТ + ХУ-фиксированная + ХУ-свободная со сжатием; стратегия 6: ОТ + ХУ-фиксированная + ХУ-свободная. Где ОТ обозначает стратегию использования повторной однослойной трассировки, пока трассируются $\alpha\%$ цепей, далее (свыше $(100 - \alpha)\%$ цепей) трассировка с помощью одной или двух моделей плоскостной пары ХУ. Здесь в случае, если $\alpha=100\%$, используется только однослойная трассировка, пока все межсоединения трассируются. В случае, когда $\alpha=0\%$, используется только повторяемая трассировка на основе моделей плоскостной пары ХУ, пока все цепи не будут трассированы. Величина β характеризует количество межсоединений, трассируемых в плате, на основе модели плоскостной пары ХУ-свободная.

Результаты эксперимента показывают, что для каждой стратегии трассировки кривые отношения по длине межсоединений, числу переходных отверстий, числу слоев платы, задержке сигналов в межсоединениях и площади контуров в плате меняются монотонно с уменьшением α . Когда выбирается лучшая стратегия по конкретному параметру, то значение функции распределения соответственно около 1,6; 2,5; 2,8; 1,5 и 1,9.

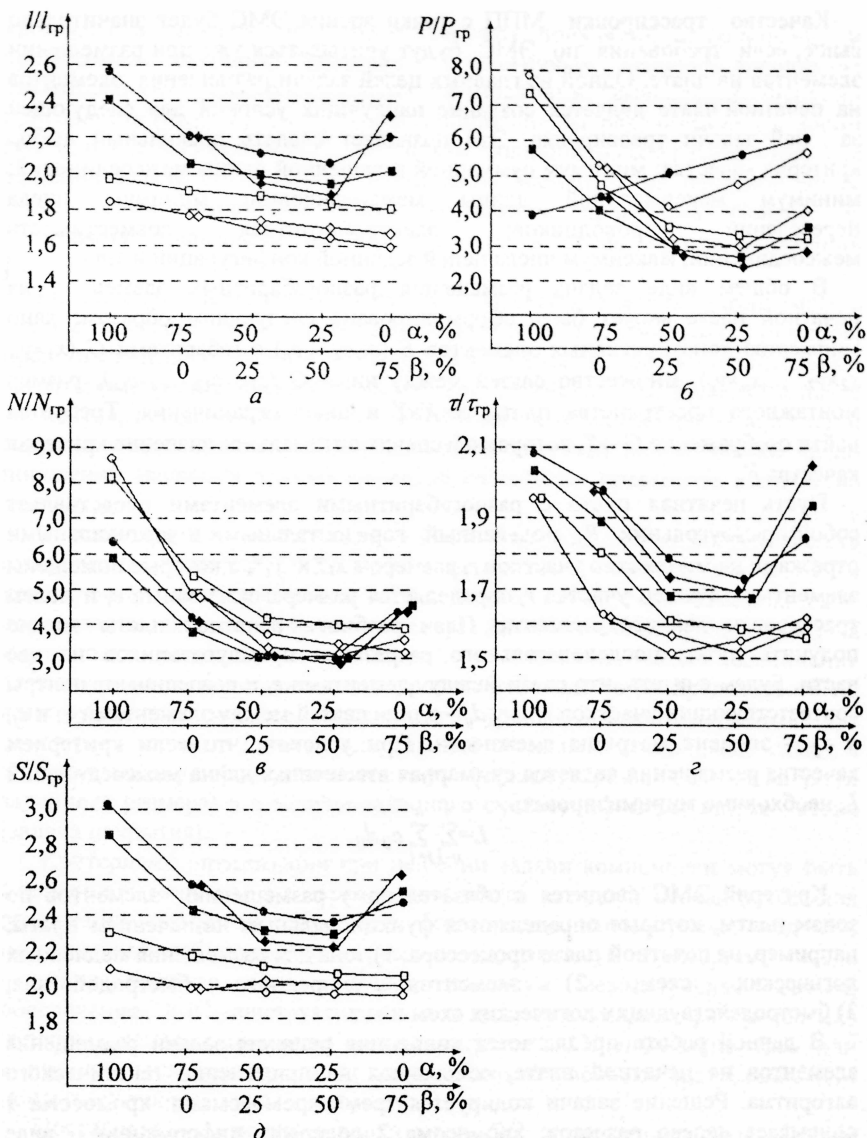


Рис. 3. Функции распределения по стратегиям трассировки (● – стратегия 1, ○ – 2, ■ – 3, □ – 4, ◆ – 5, ◇ – 6) в зависимости от α и β :
a – по длинам межсоединений; *б* – по числу переходных отверстий;
в – по числу слоев платы; *г* – по задержкам сигналов в межсоединениях; *д* – по площади контуров межсоединений

Качество трассировки МПП с точки зрения ЭМС будет значительно выше, если требования по ЭМС будут учитываться уже при размещении элементов на плате. Одной из главных целей задачи размещения элементов на печатной плате является создание наилучших условий для следующей за ней задачи трассировки. Это позволяет сделать правильный выбор критерия качества: минимум суммарной взвешенной длины межсоединений; минимум максимальной длины межсоединений; минимум числа пересечений проводников; электромагнитная совместимость межсоединений; максимум числа цепей заданной конфигурации и т.д.

В общем виде задача размещения разногабаритных элементов на печатной плате может быть сформулирована следующим образом: дано множество конструктивных элементов $E(e_1, e_2, \dots, e_n)$ с габаритами $G(x_1 \times y_1, x_2 \times y_2, \dots, x_n \times y_n)$, множество связей между ними $C(c_{11}, c_{12}, \dots, c_{nn})$, размер монтажного пространства платы $S = X \times Y$ и иные ограничения. Требуется найти отображение $G \rightarrow S$, которое обеспечит оптимальное значение критерия качества F .

Пусть печатная плата с разногабаритными элементами представляет собой прямоугольник R , поделенный горизонтальными и вертикальными отрезками на множество участков r_i размером $x_i^* \times y_i^*$, в которые помещены элементы e_i . Размер участка r_i определяется размерами элемента e_i и полем трассировки данного элемента. План разбивки печатной платы можно получить путем последовательного разрезания прямоугольников на две части. Будем считать, что связи между элементами e_i и e_j соединяют центры соответствующих участков r_i и r_j , d_{ij} – длина связей между элементами e_i и e_j , а c_{ij} – элемент матрицы смежности. При условии, что если критерием качества размещения является суммарная взвешенная длина межсоединений L , необходимо минимизировать

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} d_{ij}.$$

Критерий ЭМС сводится к обязательному размещению элементов по зонам платы, которые определяются функциональным назначением платы, например, на печатной плате процессора: 1) зона для размещения медленных логических схем; 2) элементов умеренного быстродействия; 3) быстродействующих логических схем и т.д.

В данной работе предлагается концепция решения задачи размещения элементов на печатной плате, основанная на применении генетического алгоритма. Решение задачи кодируется тремя хромосомами: хромосома 1 описывает дерево разрезов; хромосома 2 содержит информацию о виде разреза площади печатной платы (вертикальный или горизонтальный); хромосома 3 содержит закодированную информацию о разметке графа. Основные этапы генетического алгоритма, применяемого в задаче размещения, следующие: формирование начальной популяции; отбор

хромосом в текущую популяцию; текущая популяция; скрещивание и хромосомная мутация; удаление гомологичных особей; заполнение вакантных мест сгенерированными хромосомами; вычисление функции пригодности ($F_{пр}=1/L$) для хромосом популяции; упорядочивание хромосом по $F_{пр}$; проверка изменения $F_{пр}$; остановка эволюции; вывод результатов. Для решения задачи оптимального размещения элементов на печатной плате генетическим алгоритмом была разработана программа *Genetic R*. Программа реализована на языке *Pascal* в среде программирования *Delphi 5.0*.

Размещение элементов на печатной плате генетическим алгоритмом с учетом критерия ЭМС проводилось для ряда практических примеров, представленных в работе. Исследования показали, что вычислительные затраты имеют сверхлинейную зависимость от числа размещаемых на плате элементов, использование хромосом трех видов позволяет сгенерировать и оценить любой возможный план разбивки печатной платы, общее число поколений эволюции должно примерно на порядок превышать количество элементов.

Компоновка схем ЭС по модулям во многом предопределяет успешность соблюдения критерия ЭМС при размещении элементов на плате и трассировке межсоединений в МПП. Задача компоновки заключается в определении схемного состава конструктивных модулей. Обычно задача компоновки решается "снизу вверх", т.е. известна схема соединения элементов i -1-го конструктивного уровня, необходимо распределить ее по конструктивным модулям следующего уровня. Можно выделить два основных варианта постановки данной задачи: компоновка схем в конструктивно-унифицированные модули (задача разрезания схемы на части заданного размера) и в модули заданного схемо-унифицированного набора (задача покрытия).

Критериями оптимизации при решении задачи компоновки могут быть следующие: минимум суммарного количества модулей, необходимых для реализации схемы; минимум количества типов используемых модулей; минимальная избыточность в реализации; минимум суммарного числа внешних выводов всех модулей; минимум межмодульных связей; обеспечение ЭМС конструктивных модулей; равномерное распределение тепловыделяющих элементов между модулями. Использование того или иного критерия зависит как от вида задачи компоновки (разрезание или покрытие), так и от уровня иерархии.

Постановка задачи компоновки схем ЭС в конструктивные модули одного уровня иерархии, не имеющие схемной унификации: разрезание гиперграфа $H(X, U)$ на совокупность кусков $H_l(X_l, U_l)$, $l \in L$, где $L = \overline{1, \overline{L_k}}$ и L_k – число типовых конструкций. Совокупность кусков $B(H_l)$ называется разрезанием гиперграфа $H(X, U)$, если:

$$\begin{aligned}
& (\forall H_l \in B(H_l)) (H_l \neq \emptyset); l \in L; \\
& (\forall H_l, H_p \in B(H_l)) (X_l \cap X_p = \emptyset \ \& \ U_l \cap U_p = U_{l,p}); l, p \in L; \\
& \bigcup_{l \in L} H_l = H
\end{aligned}$$

где $U_{l,p}$ – множество ребер, попадающих в разрез между кусками H_l и H_p .

Конструктивный критерий компоновки (минимум количества межмодульных связей): $(\forall H_l \in B(H_l)) \bigcup_{l \in L, p \neq l} U_{l,p} | = \min$.

В основе критерия ЭМС лежит разделение схем на пять групп: чувствительные схемы с высоким волновым сопротивлением; чувствительные схемы с низким волновым сопротивлением; схемы умеренной чувствительности или схемы, рассчитанные на умеренный уровень потребляемой мощности; высоковольтные схемы; схемы, рассчитанные на высокий ток. Аналоговые схемы обычно попадают в первые две группы, цифровые схемы относятся к третьей группе, а схемы сопряжения и источники питания – к двум последним. Детальные рекомендации по комбинированию схем, принадлежащих к одной и той же группе или к различным группам, позволяют устанавливать варианты предпочтительного, менее предпочтительного и запрещенного сочетания элементов схем при компоновке на модули.

В данной работе предлагается концепция решения задачи компоновки, основанная на применении генетического алгоритма. Схема решения задачи компоновки ЭС с помощью генетического алгоритма представлена на рис. 4. Основные этапы генетического алгоритма следующие: формирование начальной популяции; скрещивание; мутация; вычисление функции пригодности; отбор; образование текущей популяции; проверка изменения $F_{пр}$; вывод результатов. Функциональное разбиение гиперграфа $H(X, U)$ представляется в виде хромосомы, состоящей из n генов, порядковые номера которых соответствуют номерам вершин графа. Вершины графа соответствуют функциональным узлам схемы. Назначение лица, принимающего решение, аналогично задаче многокритериальной оптимизации ЭМС межсоединений печатных плат (см. главу 4).

Для решения задачи компоновки элементов схем ЭС генетическим алгоритмом была разработана программа *Genetic K*. Программа реализована в среде программирования *Delphi 5.0*.

Компоновка схем ЭС по модулям генетическим алгоритмом с учетом критерия ЭМС проводилась для ряда практических примеров, представленных в работе. Исследования показали, что скорость и эффективность компоновки схем существенно зависит от правильной настройки управляющих параметров алгоритма, использование хромосомы одного вида является достаточным, различие между значениями функций пригодности конечных хромосом при различных начальных популяциях

составляет $\pm 3\%$ от среднего значения $F_{\text{пр}}$ последних поколений.



Рис. 4. Алгоритм решения задачи многокритериальной компоновки схем ЭС

III. Основные результаты работы

1. Разработана технология автоматизированного проектирования печатных плат цифровых ЭС с учетом критерия ЭМС.

2. Разработаны математические модели и пакет программ для анализа электрических параметров (емкостей, индуктивностей) межсоединений печатных плат.

3. Получены сравнительные результаты по исследованию методов анализа электромагнитных процессов в межсоединениях печатных плат (метода нормальных волн во временной и частотной областях, метода продвижения во времени) и разработаны соответствующие программы.

4. Разработаны модели межсоединений для анализа задержек сигналов, их искажений, отражений и перекрестных помех в печатных платах цифровых ЭС, в том числе модели с внутренним итерированием. Установлены условия дискретизации межсоединений и выбора начального шага интегрирования.

5. Предложены экспертная стратегия фрагментации межсоединений на

основе правил продукций для прогнозирования задержек сигналов, их искажений, отражений и перекрестных помех в печатных платах и подход в поиске наиболее неблагоприятных сочетаний входных сигналов фрагментов межсоединений печатных плат, приводящих к перекрестным помехам наибольшей величины, на основе использования системы Пролог.

6. Разработаны математические модели и программы для анализа: импульсных помех на шине земли (питания) многослойных печатных плат на основе метода граничных элементов; влияния статического электричества на цифровые элементы печатных плат; влияния внешнего электромагнитного поля на межсоединения многослойных печатных плат на основе метода усредненных граничных условий и решения телеграфных уравнений; электромагнитного излучения от межсоединений печатных плат на основе метода диполей Герца.

7. Разработаны процедуры оптимизации внутриаппаратурной ЭМС и многокритериальной (задержки сигналов, их искажения, отражения, перекрестные помехи, статическое электричество, внешние помехи и электромагнитное излучение) оптимизации ЭМС межсоединений печатных плат на основе генетических алгоритмов.

8. Предложены модели, стратегии, алгоритм и программа для проектирования межсоединений печатных плат, учитывающие критерий ЭМС.

9. Разработаны алгоритмы и программы для размещения элементов на печатной плате и для многокритериальной компоновки схем ЭС по модулям на основе генетических алгоритмов, учитывающие критерий ЭМС.

10. Основные результаты диссертационной работы внедрены в практику автоматизированного проектирования печатных плат цифровых ЭС на ряде промышленных предприятий и в учебный процесс в 2 технических университетах, что подтверждается актами внедрения.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Чермошенцев С. Ф. Информационные технологии электромагнитной совместимости электронных средств. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2000. – 152 с.

2. Чермошенцев С. Ф. Системы и методы анализа внутриаппаратурной электромагнитной совместимости электронных средств: Учебное пособие. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 1999. – 48 с.

3. Чермошенцев С. Ф. Электромагнитная совместимость печатных плат цифровых электронных средств // Информационные технологии. – 2001. – № 4. – С. 17–25.

4. Чермошенцев С. Ф., Бурлакова Ю. В. Оптимизация внутриаппаратурной электромагнитной совместимости межсоединений цифровых печатных плат генетическими алгоритмами // Информационные

технологии. – 2001. – № 6. – С. 6–9.

5. Чермошенцев С. Ф., Шахов А. В. Моделирование импульсных помех на шинах земли многослойных печатных плат // Информационные технологии. – 2001. – № 10. – С. 22–27, 57.

6. Чермошенцев С. Ф. Информационные технологии электромагнитной совместимости электронных и энергетических систем // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2000. – № 1-2. – С. 118–121.

7. Агапов С. В., Чермошенцев С. Ф. Методы и средства анализа и прогнозирования электромагнитных излучений от электронных средств // Информационные технологии. – 2003. – № 11. – С. 2–12.

8. Норенков И. П., Федорук В. Г., Чермошенцев С. Ф. Решение задач проектирования радиоэлектронных схем методами логического программирования // Радиотехника. – 1989. – № 2. – С. 76–78.

9. Норенков И. П., Федорук В. Г., Чермошенцев С. Ф. Прогнозирование помехоустойчивости СБИС // Электронная техника. Сер. 3, Микроэлектроника. – 1989. – Вып. 5 (134). – С. 39–41.

10. Чермошенцев С. Ф. Информационные технологии электромагнитной совместимости электронных средств // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. – 2000. – № 1. – С. 45–47.

11. Чермошенцев С. Ф. Компонентные модели межсоединений при автоматизированном проектировании электронно-вычислительных средств // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. – 1996. – № 4. – С. 24–27.

12. Чермошенцев С. Ф. Синтез критических наборов сигналов помехоустойчивых цифровых узлов при автоматизированном проектировании // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. – 1998. – № 1. – С. 39–41.

13. Чермошенцев С. Ф. Электромагнитная совместимость субнаносекундных цифровых электронных средств // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. – 1997. – № 3. – С. 20–24.

14. Чермошенцев С. Ф., Бурлакова Ю. В. Оптимизация задержек сигналов и перекрестных помех в межсоединениях цифровых печатных плат генетическими алгоритмами // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. – 2000. – № 4. – С. 33–36.

15. Чермошенцев С. Ф., Гизатуллин З. М. Моделирование влияния разряда статического электричества на элементы печатных плат электронных средств // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. – 2000. – № 2. – С. 22–26.

16. Чермошенцев С. Ф. Информационные технологии прогнозирования электромагнитной совместимости электронных средств // Электронное приборостроение: Науч.-практ. сб. – 2000. – № 1. – С. 69–73.

17. Чермошенцев С. Ф., Юдинцев И. Н. Анализ емкостных параметров межсоединений многослойных печатных плат методом конечных элементов // Электронное приборостроение: Науч.-практ. сб. – 1999. – № 12. –

С. 46–50.

18. Чермошенцев С. Ф. Анализ перекрестных помех в межсоединениях при конструировании ЭВС // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: Сб. науч. докл. III Междунар. симпозиума. – СПб., 1997. – С. 10–11.

19. Чермошенцев С. Ф. Многокритериальная оптимизация электромагнитной совместимости межсоединений печатных плат генетическими алгоритмами // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: Сб. науч. докл. V Междунар. симпозиума. – СПб., 2003. – С. 278–280.

20. Чермошенцев С. Ф. Моделирование внутриаппаратурной ЭМС элементов ЭВС // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: Сб. науч. докл. III Междунар. симпозиума. – СПб., 1997. – С. 375–376.

21. Чермошенцев С. Ф. Прогнозирование электромагнитной совместимости печатных плат цифровых электронных средств // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: Сб. науч. докл. V Междунар. симпозиума. – СПб., 2003. – С. 284–286.

22. Чермошенцев С. Ф. Электромагнитная совместимость электронно-вычислительных средств // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: Сб. науч. докл. V Междунар. симпозиума. – СПб., 2003. – С. 432–433.

23. Чермошенцев С. Ф., Бурлакова Ю. В. Оптимизация электромагнитной совместимости межсоединений цифровых электронных средств генетическими алгоритмами // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: Сб. науч. докл. IV Междунар. симпозиума. – СПб., 2001. – С. 278–281.

24. Чермошенцев С. Ф., Галимов А. С. Моделирование электромагнитных процессов в межсоединениях цифровых печатных плат // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: Сб. науч. докл. IV Междунар. симпозиума. – СПб., 2001. – С. 142–146.

25. Чермошенцев С. Ф., Гизатуллин З. М. Анализ восприимчивости цифровых элементов электронных средств к электростатическому разряду // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: Сб. науч. докл. IV Междунар. симпозиума. – СПб., 2001. – С. 150–154.

26. Чермошенцев С. Ф., Добровольцев И. В. Проектирование межсоединений многослойных печатных плат с учетом электромагнитной совместимости // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: Сб. науч. докл. IV Междунар. симпозиума. – СПб., 2001. – С. 138–141.

27. Чермошенцев С. Ф., Мальков Д. В. Синтез сигналов цифровых узлов в задачах моделирования помех // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: Сб. науч. докл. III Междунар. симпозиума.

– СПб., 1997. – С. 12–13.

28. Чермошенцев С. Ф., Суздальцев И. В. Компонировка схем электронных средств по модулям генетическими алгоритмами // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: Сб. науч. докл. V Междунар. симпозиума. – СПб., 2003. – С. 270–272.

29. Чермошенцев С. Ф., Шахов А. В. Применение метода граничных элементов в задаче моделирования распределения потенциалов и импульсных помех // Электромагнитная совместимость и электромагнитная экология: Сб. науч. докл. IV Междунар. симпозиума. – СПб., 2001. – С. 333–337.

30. Чермошенцев С. Ф. Оптимизация электромагнитной совместимости межсоединений печатных плат цифровых электронных средств // Электромагнитная совместимость и электромагнитная безопасность: Сб. докл. VIII Рос. науч.-техн. конф. – СПб., 2004. – С. 318–321.

31. Чермошенцев С. Ф. Анализ временных характеристик межсоединений субнаносекундных цифровых печатных плат // Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов: Сб. докл. V Рос. науч.-техн. конф. – СПб., 1998. – С. 237–242.

32. Чермошенцев С. Ф. Анализ задержек сигналов, их искажений и отражений в межсоединениях ЭВС // Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов: Сб. докл. IV Рос. науч.-техн. конф. – СПб., 1996. – С. 298–301.

33. Чермошенцев С. Ф. Многокритериальная оптимизация электромагнитной совместимости межсоединений печатных плат цифровых электронных средств генетическими алгоритмами // Электромагнитная совместимость: Сб. докл. VII Рос. науч.-техн. конф. – СПб., 2002. – С. 298–300.

34. Чермошенцев С. Ф. Многокритериальная оптимизация электромагнитной совместимости межсоединений цифровых печатных плат генетическими алгоритмами // Проблемы электромагнитной совместимости технических средств: Сб. докл. Всерос. симпозиума. – М., 2002. – С. 72–74.

Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 2,0. Усл. печ. л. 1,86. Усл.кр.-отт. 1,91. Уч.-изд.л. 2,0.
Тираж 100. Заказ Е 6.

Типография Издательства Казанского государственного
технического университета им. А.Н. Туполева
420111, Казань, К. Маркса, 10