

156.5575

На правах рукописи

Горбачев Андрей Александрович

УДК 681.31

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
ТРАССИРОВКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

05.13.12. - системы автоматизации проектирования

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1999

Работа выполнена в Калининградском Государственном
Техническом Университете.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор И.П. Норенков

Официальные оппоненты: Шахнов Вадим Анатольевич, д.т.н.,
профессор.

Кокотов Валерий Зямович, к.т.н.,
старший научный сотрудник.

Ведущее предприятие: ОАО "Кварц"

Защита состоится "17" июни 1999 г. в 14 час. 30 мин.
на заседании диссертационного совета Д 053.15.03 "Вычислительная и ин-
формационная техника" при Московском Государственном Техническом
Университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.
Читаться в библиотеке МГТУ.

через 1999 г.

1563375




Иванов С.Р.

Актуальность работы.

Постоянно возрастающая потребность совершенствования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и электронно-вычислительной техники (ЭВТ) является следствием высоких темпов научно-технического прогресса. В процессе их создания в настоящее время тесно переплетаются вопросы разработки схемотехники, конструкции и технологии. Резко возросли требования к максимальному сокращению времени, затрачиваемого на весь цикл разработки изделий РЭА и ЭВТ. Создаваемые изделия должны быть высокого качества, технологичны и конкурентноспособны. При этом высокая степень интеграции отдельных узлов РЭА и ЭВТ и сложность инженерных решений обуславливают применение автоматизированных и автоматических методов в процессе их разработки.

При построении систем автоматизированного проектирования (САПР) изделий РЭА и ЭВТ значительная роль отводится САПР печатных плат (ППЛ). На протяжении многих лет уровень интереса к этим системам достаточно высок. Это объясняется рядом причин, из которых наиболее важными являются следующие:

1. ППЛ являются основным средством коммутации в самом широком смысле этого понятия в РЭА, ЭВТ, приборостроении и т.д. В ближайшее время, по всей видимости, не появятся другие виды коммутации успешно конкурирующие с ППЛ по ряду таких параметров, как технологичность, стоимость, серийноспособность, электрические параметры и т.п.

2. Возникшие позднее методы проектирования интегральных схем (ИС), больших интегральных схем (БИС) и сверхбольших интегральных схем (СБИС) основывались в силу частичной общности задач на методах проектирования ППЛ, математических моделях электрических схем, оптимальных методах размещения, трассировки и т.д.

В свою очередь, потребности и возможности технологии ИС привели к дальнейшему развитию методов, используемых при проектировании ППЛ, созданию новых теоретических положений, решению новых задач.

3. Особое внимание в САПР ППЛ уделяется одной из самых сложных и трудоемких задач - трассировке печатных проводников. Важность этой проблемы состоит в том, что имеющееся множество алгоритмов автоматизированного решения задачи трассировки печатных проводников не обеспечивает 100 %-ую разводку ППЛ, обладающих высокой степенью интеграции и ограничением на габариты и количество слоев. Прежде всего, это относится к

1563375

ППЛ, предназначенным для производства бортовой РЭА и РЭА специального назначения. При этом ручная дотрассировка или перетрассировка ППЛ приводит к неоправданному увеличению времени на разработку отдельных узлов РЭА и ставит конечный результат в зависимость от квалификации специалиста, занимающегося доводкой печатных проводников.

4. Сложность проблемы трассировки обусловлена прежде всего большими трудностями в учете и формализации факторов и критериев, влияющих на конечный результат и как следствие отсутствием математических методов глобальной оптимизации, а также отсутствием математических методов решения конфликтных ситуаций.

5. Области радиоэлектронного приборостроения и ВТ являются наиболее "чувствительными" к достижениям научно-технического прогресса. Моральное устаревание техники в этих областях происходит значительно быстрее, чем в других. Постоянно повышающаяся степень интеграции ППЛ и сокращение сроков их разработки выдвигают на передний план более жесткие требования к процессу их проектирования, в том числе - повышению процента трассируемых соединений при ограниченном количестве слоев ППЛ и их разнородном элементном насыщении. Учет этих требований делает необходимым разработку новых алгоритмов, обладающих бо'льшей математической общностью и строгостью и, как следствие унификацией несмотря на то, что они могут предъявлять более высокие требования к системным ресурсам используемых средств ВТ. В частности, является перспективной разработка методов совместной трассировки нескольких электрических цепей, что позволило бы приблизиться к постановке задачи глобальной оптимизации.

6. Развитие средств ВТ обуславливает на данный момент решение проблем, связанных с проектированием ППЛ в направлении совершенствования структуры САПР как человеко-машинных систем по принципу оптимизации распределения функций между человеком и ЭВМ. В этом плане одной из особенно удачных признана концепция создания интерактивных графических систем проектирования (CAD). Сочетание интеллекта конструктора с вычислительной мощностью ЭВМ позволяет значительно повысить эффективность процесса проектирования. Однако все существующие на сегодня методы автоматизации проектирования ППЛ пока не позволяют считать, что эта задача "окончательно" решена. По-прежнему актуальной остается проблема совершенствования их алгоритмической основы с целью снижения роли субъективного фактора в процессе проектирования.

Таким образом, указанные выше факторы говорят об актуальности проблемы совершенствования математических алгоритмов трассировки ППЛ

и построении дружественных интерактивных систем проектирования, функционирующих на основе этих алгоритмов.

Цель работы.

Целью диссертационной работы является исследование и разработка методов и комплексов вычислительных алгоритмов, предназначенных для трассировки ППЛ высокой степени интеграции с ограниченным числом слоев и разнородным элементным насыщением, а также для решения конфликтов, возникающих при дотрассировке или перетрассировке двух или нескольких электрических цепей.

Основные задачи.

1. Разработать метод пространственной трассировки, ориентированный на указанный тип ППЛ.

2. Разработать математическую модель ППЛ, позволяющую использовать данный метод, а также формализовать условия, ограничения и критерии при пространственной трассировке.

3. Разработать математический метод решения конфликтов, возникающих при дотрассировке двух электрических цепей.

4. Разработать математическую модель ППЛ, ориентированную на применение метода совместной трассировки двух пар КП, принадлежащих разным электрическим цепям.

5. Разработать структуру данных и экспериментальный интерактивный программный комплекс.

6. Осуществить проверку работоспособности комплекса алгоритмов и выполнить контрольные примеры.

Методы исследований.

При решении указанных задач использовались методы теории графов, теории множеств, системного проектирования, технологии баз данных, прикладного программирования.

Научная новизна работы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен новый метод построения соединений на ППЛ, имеющих ограничение на число слоев. В отличие от распространенных подходов, ППЛ рассматривается не как множество слоев, по которым прокладываются предварительно распределенные печатные проводники, а как единый пространственный регулярный граф, на котором прокладывается оптимальный маршрут. При этом отсутствует предварительное распределение трассируемых провод-

ников по слоям, а также отсутствует разбивка электрической цепи на упорядоченные пары - электрическая цепь трассируется одновременно вся сразу.

2. Разработана математическая модель монтажно-коммутационного поля платы, ориентированная на применение метода пространственной трассировки и отличающаяся тем, что в ее рамках автоматически реализуется по-слойная приоритетность направлений соединений и заполнение слоев ППЛ трассами печатных проводников осуществляется сверху вниз по принципу максимального использования полезной площади для трассировки.

3. Предложен новый математический метод решения конфликтных ситуаций, возникающих при дотрассировке электрических цепей. Метод отличается тем, что одновременно трассируются две пары КП, принадлежащие разным электрическим цепям, с учетом их взаимного непересечения.

4. Для реализации алгоритма совместной трассировки двух пар КП, принадлежащих разным электрическим цепям разработана математическая модель ППЛ, отличающаяся тем, что в целях понижения размерности задачи ППЛ представляется множеством макродискрет, образующих регулярный пространственный граф, на котором реализуется принцип пространственной трассировки, примененный к двум электрическим цепям сразу.

Практическая реализация работы.

Практические результаты диссертационной работы в виде экспериментального программного комплекса, методики подготовки исходных данных и руководства пользователя внедрены в экспериментальное производство печатных плат специального назначения на ОАО "МЕХБАНК" (г. Калининград), в практику составления технических условий на изготовление и монтаж ППЛ на ОАО "СИСТЕМА" (г. Калининград), а также в учебные процессы в Балтийском Военно-Морском Институте (г. Калининград) и в Калининградском Государственном Техническом Университете в качестве составляющей части лабораторного практикума.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: ХУ11 Межвузовская конференция профессорско-преподавательского состава, научных и инженерно-технических работников, аспирантов калининградских вузов МРХ СССР (Калининград, 1989); Всесоюзное совещание-семинар молодых ученых и специалистов "Разработка и оптимизация САПР и ГАП изделий электронной техники на базе высокопроизводительных мини и микро ЭВМ" (Воронеж, 1989); Отраслевая научно-практическая конференция "Применение в САПР типовых и объектно-независимых программно-технических комплексов" (Омск, 1989); XIУ объе-

диненный республиканский семинар "Прикладная информатика автоматизированных систем проектирования, управления, программированной эксплуатации" (Калининград, 1989); Республиканская конференция "Разработка новых информационных технологий проектирования и управления на промышленных и разрабатывающих предприятиях" (Киев, 1990); 2-ая Республиканская научно-техническая конференция "Функционально-ориентированные вычислительные системы" (Харьков - Алушта, 1990); 4-ая Всесоюзная школа "Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами" (Харьков - Туапсе, 1990); Всесоюзная научно-техническая конференция "Микросистема - 92" (Томск - Калининград, 1992); 4-ое Международное совещание-семинар "Инженерно-физические проблемы новой техники" (Москва, 1996); 5-ое Международное совещание-семинар "Инженерно-физические проблемы новой техники" (Москва, 1998).

Публикации.

Результаты диссертационной работы отражены в 13 печатных работах.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений (184 страницы машинописного текста с иллюстрациями, список литературы из 107 наименований).

На защиту выносятся следующие вопросы:

1. Метод пространственной трассировки ППЛ.
2. Метод совместной трассировки двух пар КП, принадлежащих разным электрическим цепям.
3. Математические модели ППЛ, ориентированные на применение методов пространственной и совместной трассировки.
4. Структура и основные характеристики экспериментального интерактивного программного комплекса.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы диссертации, определена цель исследования, намечены пути ее достижения, сформулирована научная новизна полученных результатов, показана практическая значимость работы, обоснована структура работы.

В первой главе определено место задачи трассировки в общей системе проектирования и разработки изделий РЭА, дан анализ существующих алгоритмов трассировки ППЛ, указаны их достоинства и недостатки, рассмотрены основные принципы построения математических моделей ППЛ.

На основе проведенного анализа сделан вывод о том, что задача трассировки ППЛ, будучи одной из самых сложных и трудоемких в общей системе задач разработки изделий РЭА, является по своей сути задачей многокритериальной оптимизации. При ее решении приходится учитывать значительное число факторов и критериев, которые зачастую находятся во взаимном противоречии.

Отмечено, что практически все существующие на сегодняшний день многочисленные алгоритмы автоматизированного решения обладают определенными недостатками или ограничениями. Эффективность и преимущества каких-либо методов обусловлены в большинстве случаев их "узкой специализацией", то есть ориентацией на определенный конструктив плат или их элементное насыщение. Попытки их унификации носят большей частью эвристический характер.

В этой связи существует точка зрения, согласно которой следует осуществлять выбор алгоритмов трассировки по параметрам схемы и разрабатываемого узла. Однако такая структурная и параметрическая адаптация чаще всего не приводит к желаемым результатам. Причиной того является адаптация по глобальным характеристикам схемы и узла. Выбранные алгоритмы бывают лучшими при разработке одной части узла, но совершенно непригодными для другой.

Рост производительности современных средств ВТ наметил тенденцию в развитии методов параллельного рассмотрения нескольких трасс на некотором участке платы. Однако трассировка по критерию максимальной реализуемости соединений ведется только на последнем этапе. Получение же решения задачи трассировки близкого к оптимальному возможно лишь при параллельной оптимизации всех соединений. Но получение такого решения в данный момент является весьма затруднительным ввиду чрезвычайно большой размерности задачи и недостаточности вычислительных мощностей.

Таким образом, современное состояние проблемы порождает потребность в развитии обобщенных математических методов ее решения.

Во второй главе разработана математическая модель пространственного представления ППЛ с учетом ряда технологических ограничений, обоснована принятая структура данных. Разработан аппарат фиктивных длин, посредством которого достигается оптимальное заполнение слоев ППЛ печатными проводниками. Разработаны алгоритм отображения ППЛ в граф, метод пространственной трассировки печатных проводников, алгоритмы решения сопутствующих вспомогательных задач. Приведена оценка размерности задачи и степени сложности алгоритма пространственной трассировки.

Монтажно-коммутационное поле ППЛ моделируется регулярным пространственным графом $G(V, R)$, где V - множество вершин, являющихся узлами ортогональной решетки, R - множество ребер, представляющее собой физические отрезки между ближайшими соседними инцидентными вершинами.

С ППЛ связывается ортогональная система координат (X, Y, Z) , причем множество значений Z является дискретным и соответствует номерам слоев ППЛ. Вершины, имеющие одинаковые координаты (x, y) , но лежащие в разных слоях, образуют множество опорных столбцов N_c .

Все опорные столбцы вершин, образующих ортогональную сетку, нумеруются так, что между их номерами n и координатами (x, y) устанавливается взаимно-однозначное соответствие, позволяющее вычислить по номеру опорного столбца n его координаты (x, y) и наоборот. Кроме того, установленное соответствие позволяет вычислять номера опорных столбцов, инцидентных произвольно выбранному опорному столбцу с номером n . Заданная таким образом биекция дает возможность существенно сократить объем хранимой в оперативной памяти ЭВМ информации о монтажно-коммутационном поле платы, упростить процедуры переборов при решении вспомогательных задач, а также при самой трассировке.

В целях рационального использования монтажно-коммутационного поля ППЛ в ее математической модели предусмотрена автоматическая послонная приоритетность задания направлений прокладки печатных проводников. При этом заполнение слоев происходит последовательно, начиная с первого в сторону увеличения их номеров. В результате чего печатные проводники "вытесняются" кверху, оставляя для последующих трасс малозаполненными слои с более высокими номерами.

Автоматическая послонная приоритетность направлений достигается за счет преобразования координат таким образом, что слои с нечетными номерами оказываются "вытянутыми" вдоль оси Y , а слои с четными номерами - вдоль оси X . Степень "вытянутости" слоев различна и задается так, что фиктивные расстояния между одноименными точками вдоль приоритетных направлений увеличиваются с увеличением номера слоя. Кроме того, фиктивные расстояния между смежными слоями также возрастают в арифметической прогрессии с увеличением их номеров.

В процессе отображения ППЛ в граф каждому опорному столбцу $n \in N_c$ и каждой вершине $v \in V$ присваиваются определенные признаки, характеризующие состояние этих столбцов или вершин, вычисляются центры планар-

ных подграфов, образованных КП электрических цепей и длины минимальных связывающих деревьев этих подграфов.

В основу работы алгоритма пространственной трассировки положен метод Форда - Беллмана определения расстояний от источника до всех остальных вершин графа, распространенный на случай контурного неориентированного графа. Сущность работы алгоритма заключается в следующем. Аппарат фиктивных длин устанавливает правило вычисления расстояний между двумя смежными вершинами $H(v, v^*)$, где $v, v^* \in V$. Вычисляются верхние ограничения $D(v)$ на расстояния от источника $s \in V$ до всех вершин $v \in V$. Всякий раз, когда устанавливается, что

$$D(v) + H(v, v^*) < D(v^*),$$

оценка улучшается: $D(v^*) = D(v) + H(v, v^*)$.

Процесс прерывается, когда дальнейшее улучшение ни одного из ограничений невозможно. В результате значение каждой из переменных $D(v)$ равно фиктивному расстоянию от источника s до всех остальных вершин.

После проверки подграфа электрической цепи на связность осуществляется прокладка маршрута печатного проводника по принципу наименьшей фиктивной длины в направлениях от КП к источнику.

Степень сложности предлагаемого алгоритма пространственной трассировки составляет величину порядка $O((N_v)^{3/2})$, где N_v - количество вершин в графе $G(V, R)$.

В третьей главе разработана математическая модель ППЛ, основанная на пространственном макродискретном представлении. Разработан алгоритм отображения ППЛ в регулярный пространственный граф, метод совместной трассировки двух пар КП, принадлежащих разным электрическим цепям, алгоритмы определения "открытости" макродискрет, "сшивания" макродискрет и трассировки внутри макродискрет, а также алгоритмы решения сопутствующих вспомогательных задач. Сделана оценка степени сложности алгоритма совместной трассировки.

Множество вершин V графа $G(V, R)$ разбивается на непересекающиеся подмножества θ_v^V , где $v \in \mathcal{N}$ - порядок разбиения. Подмножества θ_v^V образуют плоские макродискреты, которые по своей структуре аналогичны самой ППЛ.

С ППЛ связывается та же самая, что и в главе 2, система координат (X, Y, Z) . В качестве координат макродискрета принимаются координаты опорного столбца из множества N_{1c} , имеющего наименьший порядковый номер в пределах данного макродискрета.

Вводится сплошная нумерация макродискрет и устанавливается взаимно-однозначное соответствие между номерами β и координатами макродискрет. Заданная биекция позволяет существенно сократить объем хранимой в оперативной памяти ЭВМ информации и упростить выполнение ряда вспомогательных процедур.

Монтажно-коммутационное поле ППД представляется в виде регулярного пространственного графа $\Gamma_v(S_v, U_v)$, где S_v - множество вершин, состоящее из макродискрет, U_v - множество ребер, связывающих смежные макродискреты. Локальная степень $\rho(s)$ каждой из вершин $s \in S_v$ зависит от "открытости" границ соответствующего ей макродискрета. "Открытость" границ определяется исходя из линейных размеров и из наличия внутри макродискрет вершин, принадлежащих преградам или зонам недоступным для трассировки. Согласно этому все макродискреты систематизированы по 5 видам.

Приоритетность направлений трассировки по макродискретам определяется по аналогии со способом, изложенным в главе 2.

В основу метода совместной трассировки двух пар КП (p_1, p_2) и (q_1, q_2) положены следующие соображения. Строится граф-произведение $W_v = \Gamma_v \times \Gamma_v$, в котором $T_v = S_v \times S_v$ - множество вершин, представляющее собой множество пар элементов из S_v , а F_v - множество ребер, состоящее из таких пар вершин графа $\Gamma_v(S_v, U_v)$: $((s_\beta, s_\beta^*), (s_\zeta, s_\zeta^*))$, для которых выполняется одно из условий:

$$\begin{cases} (s_\beta, s_\beta^*) \in U_v \text{ и } (s_\zeta, s_\zeta^*) \in U_v \\ (s_\beta, s_\beta^*) \in U_v \text{ и } (s_\zeta = s_\zeta^*) \\ (s_\beta = s_\beta^*) \text{ и } (s_\zeta, s_\zeta^*) \in U_v, \end{cases}$$

где s_β^* и s_ζ^* - инцидентные вершины с s_β и s_ζ соответственно.

В полученном графе $W_v(T_v, F_v)$ любой вершине $t_{\beta, \zeta} \in T_v$ соответствуют два макродискрета с номерами β и ζ (или две вершины $s_\beta, s_\zeta \in S_v$) на графе $\Gamma_v(S_v, U_v)$.

Если на графе $W_v(T_v, F_v)$ существует некоторый маршрут, удовлетворяющий требованиям оптимизации и соединяющий две вершины $t(s_{p1}, s_{q1})$ и $t(s_{p2}, s_{q2})$, то на графе $\Gamma_v(S_v, U_v)$ ему будут соответствовать две непересекающихся последовательности макродискрет, соединяющие попарно макродискреты с КП p_1 с p_2 и q_1 с q_2 , принадлежащие разным электрическим цепям.

Если окажется, что вершины $t(s_{p1}, s_{q1})$ и $t(s_{p2}, s_{q2})$ принадлежат разным компонентам связности, то производится следующее $(v+1)$ -ое разбиение множества вершин V исходного графа $G(V, R)$ на макродискреты θ^{v+1}_β .

Принцип прокладки маршрута на графе $W_v(T_v, F_v)$ состоит в следующем. Одна из вершин $t(s_{p1}, s_{q1})$ или $t(s_{p2}, s_{q2})$ выбирается в качестве источника.

Затем определяются расстояния от источника до всех остальных вершин графа $W_v(T_v, F_v)$ с учетом их локальных степеней. При этом вычисляются верхние ограничения $DW(t)$ на расстояния от выделенного источника (например, (s_{p1}, s_{q1})) до всех остальных вершин $t \in T_v$. Всегда, когда устанавливается, что

$$DW(t) + HF(t, t^*) < DW(t^*),$$

оценка улучшается: $DW(t^*) = HF(t, t^*) + DW(t)$,

где $HF(t, t^*)$ - расстояние между инцидентными вершинами t и t^* , посчитанное с учетом приоритетности направлений трассировки.

Процесс прекращается, когда дальнейшее улучшение ни одного из ограничений невозможно. В результате значение каждой из переменных $DW(t)$ будет равно расстоянию от выделенного источника (s_{p1}, s_{q1}) до всех остальных вершин графа $W_v(T_v, F_v)$.

Далее после проверки на связность осуществляется прокладка маршрута на графе $W_v(T_v, F_v)$.

Затем осуществляется сшивание макродискрет для каждой из электрических цепей и последующая трассировка внутри каждого макродискрета на основе метода разработанного в главе 2.

Степень сложности алгоритма совместной трассировки составляет величину $O((N_v)^2)$, где N_v - количество вершин в графе $G(V, R)$.

В четвертой главе сформулированы требования и принципы построения специализированного программного обеспечения, приведено описание экспериментального интерактивного программного комплекса (ИПК), реализующего метод пространственной трассировки, приведены результаты практической реализации.

Исходными данными для работы ИПК являются координаты КП электрических цепей и координаты областей, ограничивающих поле трассировки. Результатом работы ИПК является схема разводки печатных проводников.

Разработанный ИПК обладает следующими свойствами:

- Взаимодействие с пользователем осуществляется на интуитивно-понятном уровне или при помощи сообщений на естественном языке;
- Вмешательство пользователя в процесс работы возможно только в определенные, логически завершенные моменты;
- Интерактивные средства позволяют пользователю выбирать для последующей визуализации любую комбинацию отображаемых объектов;
- Программное обеспечение не накладывает никаких ограничений на количество слоев, тип плат и их элементное насыщение;
- Трассировка соединений возможна как в автоматическом, так и в интерактивном режимах;

- При включении данного ИПК в состав какой-либо САПР ППЛ с соблюдением принципа информационного единства, возможно подключение различных базовых алгоритмов трассировки;

- ИПК включает в себя подсистему проверки корректности исходных данных (на уровне этапа трассировки) и подсистему проверки результата трассировки соединений;

- Вариация внутренними параметрами ИПК позволяет сформировать достаточно большую область возможных решений. Выбор наилучшего решения осуществляется пользователем;

- ИПК снабжен контекстно-независимым руководством пользователя, помещенном в справочный файл.

Программное обеспечение ИПК носит методический характер и имеет своей целью продемонстрировать возможности и работоспособность предлагаемого метода пространственной трассировки ППЛ.

В качестве общесистемного программного обеспечения была выбрана операционная система Windows, а для реализации прикладного программного обеспечения был выбран алгоритмический язык высокого уровня Visual Basic 4.0 Professional Edition.

Приведены контрольные примеры, выполненные по методу пространственной трассировки печатных проводников для двуслойных ППЛ.

В заключении диссертации изложены выводы, в которых подведены итоги проделанной работы.

В приложениях приведено руководство пользователя для экспериментального ИПК и акты внедрения результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена математическая модель монтажно-коммутационного поля ППЛ, отличающаяся тем, что ППЛ представляется в виде регулярного пространственного графа. В рамках этой модели разработан способ представления данных об ограничениях, позволяющий рационально использовать оперативную память ЭВМ.

2. Разработан математический аппарат фиктивных длин, обеспечивающий автоматическую послойную приоритетность направлений прокладки печатных трасс без ограничения на количество слоев. При этом печатные проводники заполняют слои последовательно сверху вниз, рационально используя имеющееся пространство ППЛ.

3. Разработан метод пространственной прокладки печатных проводников на ППЛ, гарантирующий построение в 3^d -мерном пространстве трассы, если только она существует. Метод отличается тем, что обеспечивает одновременную трассировку всей электрической цепи, благодаря чему сняты вопросы о предварительной разбивке цепи на упорядоченные пары и о выборе последовательности трассировки этих пар.

4. Разработан метод решения конфликта, возникающего при трассировке или дотрассировке печатных соединений. Метод отличается тем, что позволяет вести одновременную трассировку двух пар КП, принадлежащих разным электрическим цепям.

5. Разработана математическая модель ППЛ, ориентированная на применение метода совместной трассировки двух пар КП, принадлежащих разным электрическим цепям. В модели используется макродискретное представление ППЛ в виде регулярного пространственного графа, а также предусмотрена автоматическая послойная приоритетность разводки соединений.

6. Разработан алгоритм "сшивания" макродискрет, образующих непересекающиеся последовательности участков ППЛ, по которым будут прокладываться печатные проводники, принадлежащие двум разным электрическим цепям.

7. Метод пространственной трассировки проводников и метод совместной трассировки двух пар КП, принадлежащих разным электрическим цепям ориентированы на единую информационную базу и имеют общие математические положения. Заложенные в их основу исходные представления выражены абстрактными категориями теории множеств и теории графов, что расширяет возможности по использованию предложенных методов для решения различных коммуникационных задач большой размерности.

8. Проведены эксперименты по трассировке двуслойных печатных плат с использованием разработанного ИПК. В результате экспериментов выявлено, что экономия времени составила в среднем 35 % по сравнению со временем, затраченным на трассировку этих же плат с использованием пакета P-CAD 4.5 в условиях производства. Кроме того, в ряде случаев удалось избежать дополнительных межслойных переходов.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Горбачев А.А. Алгоритм трассировки многослойных печатных плат с элементами любой структуры // Тезисы докладов ХУ11 Межвузовской конференции профессорско-преподавательского состава, научных и инженерно-технических работников, аспирантов калининградских вузов МРХ СССР.- Калининград, 1989. - С.198.

2. Горбачев А.А. Структура комплекса программ трассировки многослойных печатных плат // Тезисы докладов XVII Межвузовской конференции профессорско-преподавательского состава, научных и инженерно-технических работников, аспирантов калининградских вузов МРХ СССР.- Калининград, 1989. - С.197.

3. Горбачев А.А. Алгоритм проектирования топологии на пространственных решетках: Разработка и оптимизация САПР и ГАП изделий электронной техники на базе высокопроизводительных мини и микро ЭВМ // Тезисы докладов Всесоюзного совещания-семинара молодых ученых и специалистов.- Воронеж, 1989. - С. 122.

4. Горбачев А.А. Структура программ и алгоритм трассировки многослойных печатных плат: Применение в САПР типовых и объектно-независимых программно-методических комплексов // Тезисы докладов Отраслевой научно-практической конференции.- Омск, 1989. - С. 72.

5. Горбачев А.А. Информационно-математическая модель процедур поддержки принятия решений в конструкторском проектировании сетевых структур: Прикладная информатика автоматизированных систем проектирования, управления, программированной эксплуатации // Тезисы докладов XIV объединенного семинара.- Калининград, 1989.- С. 101.

6. Горбачев А.А. Модификация алгоритма Дейкстры для решения задач трассировки печатных плат // Деп. рук. ВИНТИ.- 1989.- 7160-В.89.- 12 с.

7. Горбачев А.А. Информатика процесса трассировки многослойных печатных плат: Разработка новых информационных технологий проектирования и управления на промышленных и разрабатывающих предприятиях // Тезисы докладов республиканской конференции.- Киев, 1990. – С. 52.

8. Горбачев А.А. Математическая модель и структура программного комплекса системы поддержки принятия решений при трассировке многослойных печатных плат // Функционально-ориентированные вычислительные системы: Тезисы докладов Второй республиканской научно-технической конференции.- Харьков-Алушта, 1990. - Ч.1.- С. 99.

9. Горбачев А.А. Интеллектуальная система поддержки принятия решений в сфере трассировки многослойных печатных плат // Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами: Аннотации докладов 4-ой Всесоюзной школы.- Харьков-Туапсе, 1990. - С. 16.

10. Горбачев А.А. Информационные аспекты проектирования топологии печатных плат // Деп. рук. ВИНТИ 1991.- 1088 - В.91.- 41 с.

11. Горбачев А.А. Алгоритм повышенной эффективности решения коммуникационных задач большой размерности: Микросистема - 92 // Мате-

риалы Всесоюзной научно-технической конференции.- Томск-Калининград, 1992. - С. 62.

12. Горбачев А.А. Алгоритм проектирования печатного монтажа в узлах радиоэлектронной аппаратуры: Инженерно-физические проблемы новой техники // Тезисы докладов Четвертого Международного совещания-семинара.- Москва, 1996. - С. 52.

13. Алешников С.И., Горбачев А.А. Об алгоритме совместной трассировки двух цепей на многослойных печатных платах: Инженерно-физические проблемы новой техники // Тезисы докладов Пятого Международного совещания-семинара.- Москва, 1998. - С. 5.

Подписано к печати 16.04.99 г. Заказ 413. Объем 1 п.л. Тираж 65 экз.
Типография КГТУ. 236000, Калининград, Советский пр.,1.