

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

---

На правах рукопису

ЛИТВИНОВА ЄВГЕНІЯ ІВАНІВНА

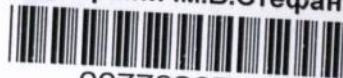
УДК 621.3.049.75.001.2:681.3

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ТОПОЛОГІЧНИХ  
МОДЕЛЕЙ БАГАТОШАРОВИХ ПЕЧАТНИХ ПЛАТ  
ТА АЛГОРИТМІВ ТРАСУВАННЯ МІЖЗ'ЄДНАНЬ

05.13.05 — Системи автоматизації проектування

Автореферат дисертації  
на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук





Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі конструктивної механіки Харківського державного технічного університету радіоелектроніки.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор АЛІПОВ МИКОЛА  
ВАСИЛЬОВИЧ.

Офіційні опоненти:

1. Доктор технічних наук, професор СЕМЕНЕЦЬ ВАЛЕРІЙ  
ВАСИЛЬОВИЧ.

2. Кандидат технічних наук, доцент ГРЕБЕННИК ВАЛЕРІЙ  
ДАВИДОВИЧ.


Провідна організація: Харківський державний приладобудівний завод ім. Т. Г. Шевченка, Міністерство машинобудування, військово-промислового комплексу і конверсії України.

Захист дисертації відбудеться „18“ січня 1996 року о „13“ годині на засіданні спеціалізованої ради К 02.25.03 у Харківському державному технічному університеті радіоелектроніки за адресою: 310726, м. Харків, проспект Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського державного університету радіоелектроніки за адресою: 310726, м. Харків, проспект Леніна, 14.

Автореферат розіслано „7“ грудня 1995 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради

 В. В. БЕЗКОРОВАЙНИЙ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**АКТУАЛЬНІСТЬ.** Швидке зростання складності електронної апаратури й удосконалення технології її виробництва призвели до різкого збільшення трудомісткості конструювання печатних вузлів. Це обумовило появу і бурхливий розвиток систем автоматизованого проектування печатних плат (САПР III), більшість з яких (зокрема - PCAD, ORCAD) мають зручний інтерфейс користувача та розвинуті сервісні можливості. Однак існуючі алгоритми трасування далекі від досконалості, потребують значних часових ресурсів і не відображують методик конструювання досвідченого конструктора; не забезпечують задовільної якості проектних рішень при великому рівні складності електричної схеми і обмеженій кількості шарів. Тому особливу актуальність набуває задача підвищення швидкодії та продуктивності алгоритмів топологічного проектування; пошуку нових ефективних способів макро- і мікротрасування.

В дисертаційній роботі розроблена й досліджена топологічна модель багат шарової печатної плати, на засадах якої синтезовані швидкодіючі алгоритми автоматизованої побудови та оптимізації великодискретного робочого поля (ВДРП), макро- і мікротрасування.

**ОБ'ЄКТОМ ДОСЛІДЖЕННЯ** є система автоматизованого проектування топології багат шарових печатних плат, побудована на засадах великодискретної моделі.

**ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕНЬ** полягає у підвищенні швидкодії і ефективності САПР III.

**МЕТОД ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ** з розробка й дослідження топологічних моделей багат шарових печатних плат (БШП), а також

синтезованих на їх засадах алгоритмів автоматизованої побудови та оптимізації великодискретного робочого поля, макро- і мікротрасування.

**ЗАДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ МЕТИ БУЛИ ПОСТАВЛЕНІ І ВИРІШЕНІ СЛІДУЮЧІ ЗАДАЧІ:**

розробка математичної моделі печатної плати і формулювання умов перехрещення трас у каналах;

синтез алгоритмів автоматизованої побудови і оптимізації ВДРП;

будування алгоритму "гнучкого" макротрасування, що дозволяє виконувати деформацію раніш прокладених з'єднань;

формулювання умов перехрещення фрагментів трас на етапі мікротрасування й синтез алгоритму побудови геометрії провідників у каналах;

розробка алгоритму перерозподілу трас по шарах.

**МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** При вирішенні вищеперелічених задач використані методи теорії графів, теорії множини, теорії алгоритмів та алгебри логіки.

**НАУКОВА І ПРАКТИЧНА НОВИЗНА** положень та результатів дисертаційної роботи полягає у тому, що вперше:

розроблено універсальну математичну модель печатної плати, яка дозволяє повністю автоматизувати процес побудови ВДРП у випадках регулярного і нерегулярного розміщення компонентів;

поставлено й вирішено задачу оптимізації ВДРП;

знайдено спосіб формулювання умов перехрещення трас у каналах, який дозволяє значно зменшити кількість математичних виразів і, отже, спростити процедуру пошуку шляху в макро-дискреті під час розповсюдження хвилі;

збудовано алгоритм "гнучкого" трасування, що вигідно відрізняється від відомих аналогів більшою швидкістю, програмною простотою, універсальністю (а саме - незалежністю від кількості типорозмірів розміщених на комутаційному-полі елементів та їх переважної орієнтації);

розроблено математичні моделі печатної плати і трас з'єднань, а також запропоновано нетрадиційний спосіб відображення топологічної ситуації у макродискреті у вигляді набору масивів даних, що дозволяє достатньо просто здійснювати переміщення раніш зафіксованих на межах каналу відрізків трас з метою прокладання нових з'єднань і надає алгоритму макротрасування якості, властиві людині-конструктору.

синтезовано новий алгоритм мікротрасування, метов якого є отримання плоскої укладки фрагментів трас усередині каналу шляхом аналізу топологічної ситуації в останньому по закінченні етапу макротрасування;

запропоновано новий оригінальний алгоритм перерозподілу трас по шарах.

#### **ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ:**

розроблено пакет прикладних програм "AL-CAD", у якому вирішено задачу підвищення швидкодії та продуктивності системи за рахунок застосування математичних моделей, які дозволяють повністю автоматизувати процес побудови ВДРП; оптимізації результатів розміщення з метою усунення надлишку макродискретів; синтезу нових ефективних алгоритмів макро- і мікротрасування;

розроблено універсальну дискретну топологічну модель печатної плати для регулярного й нерегулярного розміщення компонентів, а також різних варіантів розташування контактних

площадок по периметру установочного місця;

в'ясовано причини появи і визначено шляхи усунення надлишку макродискретів;

розроблено комбінований алгоритм оптимізації ЕДРП;

створено теоретичні засади побудови "гнучких" алгоритмів трасування зв'язків, відзначними особливостями яких є: відсутність етапів побудови мінімального зв'язуючого дерева, попереднього розшарування з'єднань, формування та розкраски графа перехрещень; простота реалізації на ЕОМ; можливість знаходження шляху між двома елементами, які з'єднуються, в разі його існування й визначення відсотка трасованості печатної плати на заданій кількості шарів ще до завершення процесу топологічного проектування;

синтезовано алгоритм аналізу топологічної ситуації в каналі, що дозволяє не тільки ідентифікувати конфлікт, але й визначити можливість його усунення за рахунок зміни конфігурації раніш зафіксованих фрагментів трас;

розроблено теоретичні засади побудови алгоритмів мікротрасування, які ґрунтуються на послідовному аналізі топологічної ситуації в каналі і відрізняються простотою реалізації на ЕОМ;

запропоновано оригінальний спосіб перерозподілу трас по шарах, що дозволяє отримати в 2-3 рази меншу кількість перехідних отвірив, ніж при трасуванні за допомогою САПР РСAD.

#### **НА ЗАХИСТ ВИНОСЯТЬСЯ СЛІДУЮЧІ ПОЛОЖЕННЯ:**

пакет прикладних програм "AL-CAD", у якому за рахунок застосування нових математичних моделей повністю автоматизовано процес побудови ЕДРП; знайдено й використано резерви значного підвищення швидкодії та ефективності САПР ПП шляхом

введення етапу оптимізації результатів розміщення компонентів з метою усунення надлишку макродискретів, синтезу нових ефективних алгоритмів макро- і мікротрасування;

універсальна великодискретна модель печатної плати, яка однаково придатна для регулярного й нерегулярного розміщення елементів та дозволяє повністю реалізувати етапи макро- і мікротрасування топологічно;

алгоритми автоматизованої побудови і оптимізації ВДРП, що дозволяють усунути надлишки макродискретів;

співвідношення, які описують умови перехрещення трас у каналах;

алгоритм топологічного макротрасування, що дозволяє виконувати деформацію раніш зафіксованих трас, має більшу швидкість, ніж відомі до наступного часу аналоги, й відрізняється програмною простотою;

спосіб оцінки швидкодії алгоритму розподілу ланцюгів по макродискретах;

співвідношення, які описують умови перехрещення фрагментів трас у каналах;

алгоритм мікротрасування, основною метою якого є усунення накладання та перехрещення відрізків трас у макродискреті за допомогою введення додаткових вертикальних і горизонтальних перегинів;

алгоритм нерозподілу трас по шарах.

**РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ.** Результати роботи отримані і реалізовані в процесі виконання держбюджетних НДР: "Високопродуктивні паралельні обчислювальні системи реального часу по обробці багатовимірних сигналів" Міністерства Освіти України, "Розробка і дослідження топологічних моделей багатоме-

рових печатних плат та алгоритмів трасування між'єднань", а також використовуються в навчальному процесі при виконанні лабораторних робіт, в курсовому й дипломному проектуванні.

**АПРОВАЦІЯ РОБОТИ ТА ПУБЛІКАЦІЇ.** Наукові результати досліджень докладались і обговорювались на науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу Харківського державного технічного університету радіоелектроніки (1993 р.); на третій міжнародній науково-технічній конференції "Контроль и управление в технических системах" у місті Вінниця (1996 р.); на міжнародній науково-технічній конференції "Прогрессивная техника и технологии машиностроения" у місті Севастополь (1995 р.); на міжнародній науково-технічній конференції "Теория и техника передачи, приема и обработки информации" у місті Туапсе (1995 р.).

Зміст роботи досить повно відображено у восьми публікаціях.

**СТРУКТУРА І ОБСЯГ РОБОТИ.** Дисертація має у своєму складі вступ, чотири розділи й закінчення, викладені на 136 сторінках, містить 18 додатків, 27 малюнків, 8 таблиць та бібліографію з 102 назв.

### ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі стисло освітлено предмет дослідження, обґрунтовано актуальність теми, дано загальну характеристику роботи. Викладено: мету дослідження; задачі, що розв'язуються; загальні положення, які виносяться на захист; наукову новизну та практичну цінність результатів.

У першому розділі виконано аналітичний огляд існуючих математичних моделей печатних плат і алгоритмів топологічного

проектування, який виявив, що в області розробки топологічних методів конструювання є ряд невирішених проблем. А саме:

відсутні швидкодіючі алгоритми "гнучкого" трасування ЕПШ із нерегулярним розміщенням компонентів;

існуючі великодискретні топологічні моделі печатних плат не дозволяють повністю автоматизувати процес побудови ВДРП;

актуальною є задача оптимізації ВДРП з метою зменшення кількості макродискретів та, отже, часу трасування і потрібного об'єму пам'яті ЕОМ;

алгоритм трасування з'єднань на засадах комбінованої моделі, що дозволяє виконувати деформації раніш проведених трас, складний в реалізації і потребує значних витрат машинного часу та оперативної пам'яті на формування великої і дрібнодискретного робочих полів;

у діючих алгоритмах топологічного проектування передбачено вирішення задачі мікротрасування традиційними способами за допомогою хвильових або каналних алгоритмів, що нераціонально, бо в результаті виконання першого етапу отримано такий розподіл трас по магістралях без перехрещень. Тому доцільно провести роботу по розробці швидкодіючих алгоритмів мікротрасування, метою яких є визначення такої сукупності точок перехрещень трас, за якої останні не перехрещуються і не накладаються одна на одну.

Все сказане обумовило вищеперелічені задачі дослідження.

У другому розділі наведено розв'язання слідуєчих задач: розробка універсальної великодискретної топологічної моделі печатної плати; побудова і оптимізація ВДРП для регулярного та нерегулярного розміщення, а також різних варіантів розта-

шування контактних площадок по периметру установочного місця; визначення способу опису топологічної ситуації в макродискреті й формування умов перехреснення трас.

Задля реалізації принципу поетапного трасування запропонована модель, в якій комутаційне поле зображено у вигляді сукупності макродискретів, отриманих шляхом продовження ліній, що обмежують установочні місця елементів. Прямі, за допомогою яких здійснюється розподіл комутаційного простору, були названі сікучими. Кількість дискретів залежить від відносного розташування й сполучення типорозмірів елементів, розміщених у вертикальних і горизонтальних рядах. У дисертаційній роботі розглянуті питання покращення результату первісного розміщення без зміни відносного розташування елементів. Задача вирішується в два етапи. На першому етапі здійснюються незначні переміщення компонентів у межах вертикального або горизонтального ряду з метою установавання лівого нижнього або правого верхнього кутів прямокутника, що описує установочне місце, на ближчі до них секучі вісей  $Ox$  та  $Oy$ . Дана задача вирішена за допомогою процедури, яка нагадує розповсюдження хвилі, джерелом якої є елемент, розташований поблизу лівого нижнього кута печатної плати. На другому етапі оптимізації ВДРП виконується мінімізація кількості секучих за рахунок зміни типорозмірів компонентів. Суть цього етапу полягає в усуненні секучих, на яких не розташовані ряди контактних площадок компонентів.

Задля реалізації алгоритму побудови та оптимізації ВДРП використані вхідні й робочі масиви даних, структура яких докладно висловлена в дисертаційній роботі.

Топологічна модель трас печатних з'єднань базується на

теорії множини. Кожен макродискрет, що являє собою канал для трасування  $D_\alpha$ , відображується сукупністю чотирьох впорядкованих підмножин  $L_{\alpha_j}$  ( $j=\overline{1,4}$ ), елементами яких є номери трас, що проходять відповідно через ліву, праву, нижню й верхню боки дискрету. Кожна підмножина  $L_{\alpha_j}$  становить сімейство підмножин, які не пересікаються, тобто  $L_{\alpha_j} = \{ L_{\alpha_j}^k \mid k \in K \}$ , де  $K$  - множина індексів. До підмножини  $L_{\alpha_j}^1$  віднесені перші  $m$  елементів підмножини  $L_{\alpha_j}$ , до  $L_{\alpha_j}^2$  - решта елементів, де  $m$  - номер магістралі дискрету, уздовж якої проходить траса  $N \in L_{\alpha_j}$ , що прокладається. Між магістралями каналу  $D_\alpha$  та позиціями підмножини  $L_{\alpha_j}$  задана взаємно однозначна відповідність  $M_n(D_\alpha) \rightarrow P_k(L_{\alpha_j})$ , де  $M_n(D_\alpha)$  -  $n$ -та магістраль дискрету  $D_\alpha$ ;  $P_k(L_{\alpha_j})$  -  $k$ -та позиція підмножини  $L_{\alpha_j}$ . Оскільки хвиля може підійти до будь-якої сторони каналу, кількість можливих конфліктних ситуацій усередині дискрету, кожна з яких описується за допомогою окремого математичного виразу, дорівнює двомстам двом. Введення додаткових параметрів  $\beta$  ( $\beta=\overline{1,4}$ ),  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ , що визначають номери сторін каналу, які перетинає хвиля, дозволило спростити умови перехрещення трас і зменшити кількість співвідношень від двохсот двох до шести.

$$\beta_1 = \begin{cases} (\beta+2) \bmod 4, & \text{якщо } \beta=\{1,3\}; \\ (\beta+1) \bmod 4, & \text{якщо } \beta=\{2,4\}; \end{cases} \quad \beta_2 = \begin{cases} (\beta+3) \bmod 4, & \text{якщо } \beta=\{1,3\}; \\ (\beta+2) \bmod 4, & \text{якщо } \beta=\{2,4\}; \end{cases}$$

$$\beta_3 = \begin{cases} \beta+1, & \text{якщо } \beta=\{1,3\}; \\ \beta-1, & \text{якщо } \beta=\{2,4\}. \end{cases}$$

Таким чином, ланцюг  $N \in L_{\beta} \cap L_{\beta_3}$ , що проходить через протилежні сторони дискрету, перетинає всі раніш прокладені траси  $N_1$ , для яких вірно співвідношення:

$$N_1 \in \{L_{\beta}^2 \cup L_{\beta_3}^2 \cup L_{\beta_2}\} \cap \{L_{\beta}^1 \cup L_{\beta_3}^1 \cup L_{\beta_1}\}.$$

В роботі сформульовані також умови перехрещення для траси  $N$ , яка проходить через суміжні сторони каналу  $\left[ N \in L_{\beta} \cap \{L_{\beta_2} \cup L_{\beta_1}\} \right]$ , і траси  $N$ , яка перетинає лише одну сторону дискрету  $\left[ N \in L_{\beta}^1 \cap L_{\beta}^2 \right]$ ; докладно описана структура робочих масивів.

Виконані в цьому розділі дослідження дозволили:

розробити універсальну дискретну топологічну модель печатної плати для регулярного й нерегулярного розміщення компонентів, а також різних варіантів розміщення контактних площадок по периметру установочного місця;

виявити причини появи і визначити шляхи усунення надлишку дискретів;

розробити комбінований алгоритм оптимізації ВДРП, який дозволяє зменшити кількість дискретів за рахунок покращення результату первісного розміщення компонентів без зміни відносного розташування останніх;

сформулювати умови перехрещення трас у дискреті;

синтезувати алгоритм аналізу топологічної ситуації в каналі, який дозволяє не тільки ідентифікувати конфлікт, але й визначити можливість його усунення за рахунок зміни конфігурації раніш зафіксованих фрагментів трас.

У третьому розділі наведені рішення задач синтезу алгоритмів топологічного (макро-) і геометричного (мікро-) тра-

сування, визначені стратегії та збудовані алгоритми процедур розподілу провідників по макродискретах і фіксації трас у каналах. Розроблений спосіб перерозподілу ланцюгів по слоям.

Великодискретна модель печатної плати, яка описана у другому розділі, дозволяє вирішити задачу пошуку шляху між двома точками А і В за допомогою модифікованого хвильового алгоритму, у якому хвиля поширюється по макродискретах. Джерелом хвилі є один із суміжних каналів, що містить в собі початкову вершину (точку А) з'єднання. Приймачем хвилі вважається один із суміжних дискретів, до яких належить чергова вершина розглядаемого ланцюга (точка В) або раніш розподілений фрагмент траси. Це дозволяє виключити етап побудови мінімального зв'язуючого дерева, яке практично неможливо реалізувати без змін у вигляді топологічного рисунка, особливо – при великій кількості зв'язків. Задача побудови квазіоптимального дерева вирішується послідовно для кожного ланцюга з урахуванням конкретної топологічної ситуації. При поширенні хвилі враховується можливість проведення траси у напрямку кожного з суміжних дискретів. Якщо побудова шляху без конфліктів із раніш призначеними до каналу трасами неможлива, то відповідний суміжний дискрет не може бути включений у фронт. Процес розповсюдження хвилі завершується, якщо у фронт включений один із суміжних каналів, що містить точку В, у напрямку якої усе-редині дискрету можливе будівництво траси без перехрещень. Якщо прокладання шляху в каналі-приймачі неможливе – за останній вважають другий дискрет, до якого належить точка В, та процес пошуку шляху продовжують.

Далі іде процес будівництва траси з точністю до магістраль-лей сторін каналів, які перетинає хвиля. Траса проходить че-

рез суміжні канали, індекс довжини яких зменшується на одиницю. Заповнення шарів печатної плати здійснюється послідовно один за другим, що дозволяє виключити етапи побудови графа перехрещень і його розкраски. У випадку необхідності зменшення кількості шарів можливий перерозподіл трас, що розміщені на надлишкових шарах за допомогою введення міжшарових переходів.

Далі в розділі наведена кількісна оцінка потрібних машинних ресурсів та швидкодії алгоритму макротрасування. Об'єм оперативної пам'яті ЕОМ, необхідний для відображення ВДРП, визначається за допомогою слідуєчого виразу:

$$V = 2 \cdot c \cdot (n_x + n_y + 2) \text{ (байт)},$$

де  $c$  - кількість з'єднань електричної схеми;  $n_x, n_y$  - параметри, що характеризують кількість секучих прямих вісей  $Ox$  та  $Oy$  на етапі розподілу комутаційного простору на канали. Час, необхідний для вибору варіантів закріплення траси у дискреті, можливо приблизно оцінити за допомогою виразу:

$$T = (\tau_0 + \tau_c) \left[ \rho_j(\rho_j - 1) + \rho_j(\rho_1 - 1) + (\rho_1 - 1) \left[ 1 + \frac{(\rho_1 - 1)}{2} \right] \right] + 2(\tau_0 + \tau_c) \left[ 2 \cdot \rho_j^2 + \rho_1^2 + 2 \cdot \rho_1 \rho_j - 3 \cdot \rho_j - 2 \cdot \rho_1 \right],$$

де  $\tau_0$  - час операції вибору даних із робочого масиву;  $\tau_c$  - час операції порівняння;  $\rho_1, \rho_j$  - середня пропускна спроможність біків дискрету.

Час  $T$  у каналі, що має пропускні спроможності  $\rho_1 = \rho_j = 10$ :

$$T = (\tau_0 + \tau_c) \cdot 10^3.$$

З метою вирішення задачі мікротрасування, що полягає в

пошуку такого варіанта розташування фрагментів трас, призначених у даний канал, при якому відрізки провідників не перехрещуються та не накладаються один на одний, сформульовані додаткові умови перехрещення фрагментів трас у каналі для різних варіантів конфігурації ланцюга  $N$ . Ланцюг  $N \in L_{\beta} \cap L_{\beta_3}$ , що проходить через протилежні боки дискрету уздовж магістралей  $m_1, m_2$  і має подвійний вертикальний перегин на магістралі  $m_n$ , перетинає траси  $N_1$ , для яких справедливі співвідношення:

$$\begin{cases} N_1 \in L_{\beta}^2 \cap \left( L_{\beta_3}^3 \cup L_{\beta_2}^2 \right) \\ N_1 \in L_{\beta_3}^2 \cap \left( L_{\beta}^1 \cup L_{\beta_1}^1 \right) \end{cases} .$$

Підмножини  $L_{\beta_j}$  формуються так, як це було описано вище, з тією лише різницею, що множина індексів для  $L_{\beta_3}$  й  $L_{\beta}$  складається з трьох елементів  $\{1,2,3\}$ , а для  $L_{\beta_1}$  і  $L_{\beta_2}$  - з двох:  $\{1,2\}$ .

Для того, щоб на етапі мікротрасування уникнути перехрещень траси  $N$  із трасами  $N_1$ , необхідно виконати наступні операції: ввести додаткові вертикальні та горизонтальні перегини для траси  $N$ ; перед побудовою геометрії траси  $N$  зарезервувати відрізки магістралей для провідників, які вона може перетинати у подальшому.

Алгоритм перерозподілу трас по шарах базується на вивченні топологічної ситуації за допомогою перевірки умов перехрещення прямолінійних фрагментів провідників, наведених у підрозділі 3.6, й близький по своєму принципу дії до міркувань людини-конструктора, що вирішує подібну задачу.

На базі виконаних досліджень розроблені:

стратегія "гнучкого" трасування, в якій передбачені слідуючі процедури: аналіз топологічної ситуації, зміна конфігурації раніш зафіксованих фрагментів трас з метою усунення конфліктів і визначення відсотка трасованості печатної плати на заданій кількості шарів ще до завершення процесу топологічного проектування;

хвильовий алгоритм макротрасування, відзначними особливостями якого є: простота реалізації на ЕОМ; відсутність етапів побудови мінімального зв'язуючого дерева, розшарування з'єднань та розкраски графа перехрещень; можливість знаходження шляху між елементами, які з'єднуються, у випадку його існування;

спосіб оцінки швидкодії алгоритму розподілу ланцюгів по дискретах;

спосіб опису додаткових умов перехрещення фрагментів трас у каналах;

стратегія мікротрасування, основною метою якої є усунення накладання й перехрещення фрагментів трас у дискреті шляхом введення додаткових вертикальних і горизонтальних перегородків;

алгоритм побудови геометрії провідників, що базується на послідовному аналізі топологічної ситуації в каналі й відрізняється простотою реалізації на ЕОМ;

умови перехрещення ортогональних фрагментів трас і алгоритм перерозподілу трас по шарах, принцип дії якого оснований на всебічному аналізі необхідності установалення перехідних отвір'їв, що дозволяє уникнути появи невиправдано великої кількості останків.

У четвертому розділі описані склад і структура пакету прикладних програм (ППП) "AL-CAD", що розроблений на засадах топологічного методу трасування багат шарових печатних плат.

ППП "AL-CAD" містить слідуєчі програмні блоки: введення початкових даних; побудова й оптимізація великодискретного робочого поля; макротрасування; мікротрасування; перерозподіл трас по шарах; узгодження формату вихідної інформації ППП "AL-CAD" та вхідного формату САПР PCAD.

Комплексо програм реалізован на мові Turbo Pascal для IBM PC/AT.

Обмеження на проектування: потрібний об'єм оперативної пам'яті - 640 К; максимальна кількість вершин графа з'єднань - 1000; максимальна кількість елементів схеми - 50; максимальна кількість з'єднань - 330; максимальні габарити плати - 340 x 360 мм; максимально можлива кількість шарів - 10.

У зв'язку з великою кількістю дій, що виконуються, і обмеженістю оперативної пам'яті розміром 640К ППП "AL-CAD" побудований по модульному принципу. Причому більшість модулів оверлейні й завантажуються в пам'ять по мірі необхідності. Формування вхідних масивів ланцюгів та установочних місць здійснюється в інтерактивному режимі і завершується утворенням двох типізованих файлів із початковими даними, які використовуються в подальшому. Для виконання власно топологічного проектування розроблений ряд програмних модулів та процедур, що докладно описані в даному розділі й містять процедури пошуку і побудови шляху, переміщення раніш зафіксованих на межах каналу фрагментів трас та ін. Прагнення скоротити розмір програми дозволило знайти раціональну структуру робочих масивів та вибрати унікальний набір параметрів, за допомогою чого

вдалося ще більше спростити умови перехрещення трас і об'єднати їх в одному виразі:

$$\exists (JKL \in A \wedge JKM \in B) ((NOR=NOR1 \wedge I2 \neq 0) \vee \\ \vee (NOR=NOR1 \wedge NOR \neq HAS1 \wedge I2=0)),$$

де змінні NOR, NOR1 визначають номери трас, підведених до елементів топології, що розміщені відповідно за адресами JKL і JKM в основному робочому масиві; змінні HAS1, I2 відображують номери контакта-приймача траси і установочного місця (у випадку підключення до раніш зафіксованого фрагмента ланцюга значення HAS1 дорівнює номеру останнього й I2=0); впорядковані підмножини A, B (множини допустимих значень змінних JKL, JKM) складаються з елементів, що являють номери магістралей каналу, і становлять підмножини  $L_{\alpha_j}$ .

У цьому ж розділі наведені результати експериментальної перевірки ефективності роботи ППП "AL-CAD". Дана порівняльна оцінка останнього з найбільш розповсюдженим сьогодні аналогом САПР PCAD версії 4.5.

Суттєвими перевагами ППП "AL-CAD" є: простота в опануванні, висока швидкодія та якість топологічного рисунка.

У додатках наведені копії актів про впровадження й використання результатів дисертаційної роботи, а також тексти програмних модулів ППП "AL-CAD".

#### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Запропонована універсальна модель печатної плати для регулярного й нерегулярного розміщення елементів, яка дозволяє реалізувати етапи макро- і мікротрасування топологічно, а

також, на відміну від відомих аналогів, повністю автоматизувати процес побудови великодискретного робочого поля.

2. Виявлені причини появи і визначені шляхи усунення надлишку каналів.

3. Розроблені алгоритми автоматизованої побудови та оптимізації ВДРП.

4. Отримані співвідношення, що описують умови перехрещення трас у дискреті; синтезований алгоритм аналізу топологічної ситуації в каналі, що дозволяє не тільки достатньо просто ідентифікувати конфлікт, але й визначити можливість його усунення за рахунок зміни конфігурації раніш зафіксованих фрагментів трас.

5. Побудований алгоритм топологічного макротрасування, що має більшу швидкість, ніж відомі до наступного часу аналоги, і характеризується рядом особливостей: простотою реалізації на ЕОМ; відсутністю етапів формування мінімального зв'язуючого дерева, розшарування з'єднань та розкраски графа перехрещень; гарантованою можливістю знаходження шляху між елементами, що з'єднуються, за умов його існування.

6. Запропонований оригінальний спосіб побудови геометрії провідників на базі послідовного аналізу топологічної ситуації в каналі, що відрізняється простотою реалізації на ЕОМ.

7. Розроблений пакет прикладних програм "AL-CAD".

Перелічені вище основні результати роботи є підтвердженням того, що завдяки використанню резервів, які надає нова універсальна дискретна топологічна модель печатної плати, і нетрадиційним підходам до вибору структури масивів даних й організації процесу пошуку конфліктів вдалося синтезувати швидкодійні, універсальні алгоритми топологічного проектуван-

ня. Отже можна зробити висновок, що в роботі створені теоретичні, математичні та програмні основи побудови ефективних систем автоматизованого проектування багатослових печатних плат.

Основний зміст дисертації опубліковано у таких роботах:

1. Алгоритм построения геометрии трасс в макродискретах / Алипов Н.В., Литвинова Е.И.; Харьк. техн. ун-т радиоэлектроники.- Харьков, 1994.- 18 с.: ил.- Библиогр.: 2 назв.- Рус.- Деп. в ГНТБ Украины 17.02.96, N438-Ук96.
2. Алгоритм построения минимального связывающего дерева на ортогональной сетке / Алипов Н.В., Литвинова Е.И.; Харьк. техн. ун-т радиоэлектроники.- Харьков, 1994.- 21 с.: ил.- Библиогр.: 3 назв.- Рус.- Деп. в ГНТБ Украины 01.08.94, N1462-Ук94.
3. Дискретная топологическая модель печатной платы / Алипов Н.В., Литвинова Е.И.; Харьк. техн. ун-т радиоэлектроники.- Харьков, 1994.- 13с.:ил.- Библиогр.: 3 назв.- Рус.- Деп. в ГНТБ Украины 01.08.94. N 1466-Ук94.
4. Комбинированный алгоритм оптимизации крупнодискретного рабочего поля / Алипов Н.В., Литвинова Е.И.; Харьк. техн. ун-т радиоэлектроники.- Харьков, 1994.- 16 с.: ил.- Библиогр.: 2 назв.- Рус.- Деп. в ГНТБ Украины 17.02.96, N429-Ук96.
5. Подсистема трассировки многослойных печатных плат на основе крупнодискретной модели / Алипов Н.В., Литвинова Е.И.; Харьк. техн. ун-т радиоэлектроники.- Харьков, 1994.- 22 с.: ил.- Библиогр.: 1 назв.- Рус.-Деп. в ГНТБ Украины 15.08.94 N1627-Ук94.
6. Алипов Н.В., Литвинова Е.И. Гибкий алгоритм трассировки многослойных печатных плат // Прогрессивная техника и техно-

логии машиностроения. Тезисы докладов международной научно-технической конференции. 12-15 сентября 1995 г.- Донецк: ДонГТУ, 1995.-с.7.

7. Алипов Н.В., Литвинова Е.И. Пакет прикладных программ для проектирования топологии многослойных печатных плат / Международная конференция "Теория и техника передачи, приема и обработки информации": Тез. докл./ХТУРЭ, Туапсе, 1995.- с.152.

8. Алипов Н.В., Литвинова Е.И. Проектирование топологии многослойных печатных плат. на основе крупнодискретной модели // Тези доповідей третьої міжнародної науково-технічної конференції "Контроль і управління в технічних системах".- Вінниця, 1995.

Особиста участь автора в отриманні наукових результатів.

Дисертаційна робота є підсумком особистої роботи автора.

В роботах, написаних у співавторстві, особисто автором розроблено: універсальну великодискретну модель печатної плати; алгоритми автоматизованої побудови та оптимізації ВДРП; співвідношення, які описують умови перехрещення трас у каналах; алгоритм топологічного макротрасування; спосіб оцінки швидкодії алгоритму розподілу ланцюгів по макродискретах; співвідношення, які описують умови перехрещення фрагментів трас у каналах; алгоритм мікротрасування; алгоритм перерозподілу трас по шарах; пакет прикладних програм "AL-CAD".

#### АННОТАЦІЯ

Литвинова Е.И. Разработка и исследование топологических моделей многослойных печатных плат и алгоритмов трассировки межсоединений. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - системы автома-

тизации проектирования, Харьковский государственный технический университет радиозлектроники, Харьков, 1996. Диссертацией является рукопись.

Разработана универсальная крупнодисcretная модель печатной платы для регулярного и нерегулярного размещения элементов, которая позволила реализовать этапы макро- и микротрассировки топологически и, в отличие от известных аналогов, полностью автоматизировать процесс построения крупнодисcretного рабочего поля. Поставлена и решена задача оптимизации крупнодисcretного рабочего поля. Получены соотношения, описывающие условия пересечения трасс в канале, на основе которых синтезирован алгоритм топологической макротрассировки, обладающий большим быстродействием, чем известные до настоящего времени аналоги. Предложен оригинальный способ построения геометрии проводников, основанный на последовательном анализе топологической ситуации в канале и отличающийся простотой реализации на ЭВМ. Разработан пакет прикладных программ "AL-CAD".

#### THE SUMMARY

Litvinova E.I. Designing and research of topology models of multilayer printed-circuit-boards and algorithms of interconnections routing. The dissertation for the Candidate degree of the technical sciences on the speciality 05.13.05 - Computer Aided Design. The Kharkov State Technical University of Radioelectronics, Kharkov, 1995. The dissertation is manuscript.

The universal large-sized diskrete model of printed-circuit-board for regular and irregular accomodation of elements is developed. It has allowed to realize the stages mak-

ro- and microroute topologically and, in difference from known analogues, completely to automate the process of construction of large-sized diskrete working field. The task of large-sized diskrete working field optimization is set and solved. The expressions, which circumscribe of routes intersection conditions in diskrete, are received on the basis of which the macroroute topological algorithm, having of large speed, than analogues known till now is developed. The original way of routes geometry construction, based on consecutive analysis of topological situation in channel and distinguished by simplicity of realization on computer is offered. The pack of applied programs "AL-CAD" is developed.

**Ключові слова:** система автоматизованого проектування (САПР), алгоритм, програма, модуль, ефективність, швидкодія, продуктивність, аналіз, топологічна модель, багат шарова печатна плата, умови перехрещення трас, топологічна ситуація, конфлікт, секуча, фронт хвилі, зона усталеного розміщення, джерело, приймач, макротрасування, мікротрасування, оптимізація, розміщення, великодискретне робоче поле, дерево Штейнера, макродискрет, канал, деформація фрагментів трас, розповсюдження хвилі, перерозподіл трас, пакет прикладних програм "AL-CAD".

---

Об'єм 1,25 д.а.

Підписано до друку 29.II.95 р.

Обл.-видав. а.1

Тираж 100 пр.

Формат паперу 60x84

Зам. 22/268

---

Друкарня ХВУ, пл. Свободи, 6

452620

AB 33.939

**AB 33.939**

[Faint, illegible text from a document, possibly a bill or report, covering the majority of the page.]