

20. Gaydyshev I. Analiz i obrabotka [Analysis and processing]. Saint Petersburg, 2006, pp. 750-754.
21. Monakhova O.A. Registratsiya karrdiointervalogrammy po veyvletnomu spektru elektrokardiogrammy [Check cardiointervalogram in the wavelet spectrum of the electrocardiogram]. Saratov, 2009, pp. 10-17.
22. Monakhova O.A. Issledovanie tonkoy struktury elektrokardiograficheskogo signala metodami veyvletnogo analiza [Investigation of the fine structure of the electrocardiographic signal by wavelet analysis methods]. Saratov, 2009, pp. 119-132.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор З.М. Юлдашев.

Рәгәб Ага Мохамәд – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»; e-mail: aga.mod@hotmail.co.uk; 197376, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5; тел.: 88122343059; кафедра биотехнических систем; аспирант.

Ragheb Agha Mokhamed – Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”; e-mail: aga.mod@hotmail.co.uk; 5, prof. Popova street, Saint Petersburg, 197376, Russia; phone: +78123464487; the department of biotechnical systems; graduate student.

УДК 681.324

DOI 10.18522/2311-3103-2020-5-40-51

В.И. Потапов

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАПРЕЩЕННЫХ ФИГУР В ЗАДАЧЕ РАСКРАСКИ ГРАФА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Проектирование конструкции печатных плат в виде плоских структур без перемычек является одной из самых сложных задач на этапе схемотехнического проектирования. Задача в такой постановке особенно актуальна микросборок и для электронных модулей контрольно-проверочной, бортовой аппаратуры, выполненных по технологии поверхностного монтажа, где, например, по причине металлического теплоотвода или керамического основания, структура соединений возможна только в одном слое. В работе рассматривается задача проектирования печатных плат в виде синтеза плоских структур электронных схем. Целью является расположение соединений на печатной плате без пересечений, что облегчает условия проведения трасс любому трассировщику современных программ проектирования. Для её решения предложено большое число различных алгоритмов, основным недостатком которых является заложенный в них принцип последовательного и фрагментарного просмотра коммутационного пространства. Сложность алгоритмов синтеза подобных структур обусловлена также необходимостью учета большого числа различных требований, связанных со спецификой их изготовления и особенностями разрабатываемого конструктивно-технологического решения. В настоящей работе предлагается выполнить проектирование печатной платы с высокой эффективностью трассировки соединений за счет решения задачи расслоения исходного графа-схемы и построения плоского графа-схемы как на стороне установки ЭРЭ, так и на обратной стороне платы - стороне пайки, исключая запрещенные фигуры по теореме Потрягина-Куратовского. Критерием является минимизация переходных отверстий, а также минимизация проводников (ребер) на одной стороне печатной платы. Задача расслоения представляет собой задачу раскраски графа в два цвета с использованием принципов характеристического управления, решение которой базируется на теореме Кенига, определяющей запрещенную фигуру в виде циклов нечетной длины. Для проектирования печатных плат разработаны алгоритм и методика построения планарных графов и расслоения графа на две стороны печатной платы с уменьшением количества неразведенных ребер. Точное решение принимает вид полиномиальной зависимости не выше 5-й степени, позволяющей получить результат за приемлемое время и повысить эффективность трассировки на 5–15 %.

Плоские структуры электронных средств; графо-теоретический подход; запрещенные фигуры; трассировка в одном слое; граф; ребро графа; планарность; алгоритм; анализ; синтез; электро-радиоэлемент.

V.I. Potapov

APPLICATION OF FORBIDDEN SHAPES IN THE GRAPH COLORING PROBLEM WHEN DESIGNING PRINTED CIRCUIT BOARDS

Designing a printed circuit board in the form of flat structures without jumpers is one of the most difficult tasks at the stage of circuit design. The task in this formulation is especially relevant for micro-assemblies for electronic modules of control and verification, on-board equipment, made using surface-mount technology, where, for example, due to a metal heat sink or a ceramic base, the structure of connections is possible only in one layer. The paper deals with the problem of designing printed circuit boards in the form of synthesis of flat structures of electronic circuits. The goal is to position the connections on the PCB without overlapping, making it easier for any router in modern design programs to route. To solve it, a large number of different algorithms have been proposed, the main disadvantage of which is the principle of sequential and fragmentary viewing of the switching space inherent in them. The complexity of the algorithms for the synthesis of such structures is also due to the need to take into account a large number of different requirements associated with the specifics of their manufacture and the features of the developed constructive and technological solution. In this paper, it is proposed to design a printed circuit board with a high efficiency of routing connections by solving the problem of stratifying the original graph-scheme and constructing a flat graph-scheme both on the installation side of the electrical radio elements and on the reverse side of the board - the soldering side, excluding forbidden figures according to Potryagin's theorem - Kuratovsky. The criterion is to minimize vias as well as minimize conductors (fins) on one side of the PCB. The bundle problem is a graph coloring problem in two colors using the principles of characterization control, the solution of which is based on the Koenig theorem, which defines a forbidden figure in the form of cycles of odd length. For the design of printed circuit boards, an algorithm and method for constructing planar graphs and stratifying the graph into two sides of the printed circuit board with a decrease in the number of undistributed edges have been developed. The exact solution takes the form of a polynomial dependence not higher than the 5th degree, it allows you to get the result in a reasonable time and increase the tracing efficiency by 5–15 %.

Flat structure of electronic means; graph-theoretical approach; prohibited figures; trace in a single layer; graph; an edge of the graph; planarity prohibited figure; algorithm; analysis; synthesis; electric radio element.

Введение. Проектирование конструкции печатных плат без перемычек является одной из самых сложных задач на этапе конструирования. Задача в такой постановке особенно актуальна для бортовых электронных модулей, выполненных по технологии поверхностного монтажа, где, например, по причине металлического теплоотвода или керамического основания, структура соединений возможна только в одном или двух слоях.

Для её решения предложено большое число различных алгоритмов [1–3, 5, 9–11], основным недостатком которых является заложенный в них принцип последовательного и фрагментарного просмотра коммутационного пространства. Сложность алгоритмов синтеза подобных структур обусловлена также необходимостью учета большого числа различных требований, связанных со спецификой их изготовления и особенностями разрабатываемого конструктивно-технологического решения.

Конечная задача – получение 100 % трассировки соединений на печатной плате, для достижения которой необходимо учитывать следующие характерные свойства:

- ◆ большая размерность;
- ◆ необходимость контроля на промежуточных и окончательных стадиях, обусловленная значительным временем решения или вмешательством человека;
- ◆ недопустимость пересечения трасс, принадлежащих разным электрическим цепям;
- ◆ связь топологических ограничений со схемотехническими и теплофизическими ограничениями.

Теоретическая часть. В алгоритмическом плане задача заключается в построении для всех цепей схемы оптимальных монтажных соединений. Алгоритмические методы трассировки печатных соединений в зависимости от конструкции коммутационного поля делятся на две основные группы: топографические и графо-теоретические.

Топографические методы наиболее эффективны для трассировки двусторонних и многослойных печатных плат, подложек БИС, а также твердотельных БИС с несколькими слоями коммутации.

На первом этапе формируется список цепей, определяющий группы эквипотенциальных выводов. Здесь главной задачей является предварительное определение порядка соединений выводов внутри отдельных цепей. Такое упорядочение осуществляется с помощью алгоритмов построения минимальных деревьев.

На втором и третьем этапах решаются вопросы, на каком из слоев будет осуществляться трассировка соединений и в каком порядке. Большинство известных методов расслоения соединений основаны на анализе взаимного расположения всей совокупности соединений на одной плоскости с целью распределения конфликтующих между собой соединений по отдельным слоям. Поскольку подавляющее большинство алгоритмов трассировки принадлежит к алгоритмам последовательного типа, то порядок прокладки соединений определяется заранее.

Графо-теоретические методы трассировки предполагают предварительный анализ планарности схемы, представленной в виде графовой модели, и последующую ликвидацию пересечений с помощью технологических приемов. Окончательная фаза состоит в получении эскиза топологии схемы при оптимальном распределении функций между конструктором и САПР. Практическая реализация связана со сложностью учета различных метрических ограничений на расположение элементов и соединений. Кроме того, для корректного проведения топологического анализа необходимо применять адекватные топологические модели элементов, электрических соединений и конструкции коммутационной схемы. В этой группе методов центральное место отводится алгоритмам определения планарности графов. С точки зрения удобства реализации выделяются следующие: алгоритм Бадера-Фишера, алгоритм Дана и Чена и др.

Попытки применить графо-теоретические методы к проектированию топологии печатных плат нашли наиболее яркое отражение в работе Аусландера и Трента. Была представлена модель, позволяющая в принципе расположить схему соединений любой сложности в двух слоях с переходами между ними, при условии, что метрические параметры коммутационного поля не влияют на возможность такой раскладки. Но если межслойные переходы могут быть выполнены лишь по контактными площадкам (КП) устанавливаемых элементов, то возникает задача расположения соединений в минимальном числе слоев. В топологическом плане она сводится к нахождению минимального планарного разбиения графа схемы (задача расслоения). Однако ввиду указанных выше сложностей для практического использования наиболее приемлемыми оказались эвристические последовательные процедуры выделения планарных подграфов из исходного графа.

Расслоение осуществляется с целью распределения "конфликтующих" соединений по отдельным слоям для наиболее эффективного использования площади коммутационного поля. Алгоритмическое расслоение может выполняться до, после и в процессе трассировки отдельных соединений.

Расслоение до трассировки основано на выявлении возможностей разбиения графа схемы на минимальное число планарных подграфов с последующей реализацией этих подграфов на отдельных слоях. Основная сложность такого подхода состоит в построении точных математических моделей схемы с учетом метриче-

ских параметров коммутационного поля. Но в большинстве случаев расслоение выполняется после размещения элементов и более простой путь состоит в учете "взаимодействия" отдельных соединений или связывающих деревьев при условии их одновременного расположения на одной плоскости. При этом учитываются метрические параметры соединений, так как положение КП на коммутационном поле уже известно. Наиболее распространенным приемом является выделение некоторых приоритетных направлений, группирование соединений в соответствии с выбранными направлениями и разнесение этих групп на отдельные слои.

Фундаментальные теоретические основы указанного подхода заложены работами Кодреса и Вайссмана. Задача Кодреса заключается в ликвидации минимального числа пересечений таким образом, чтобы было возможно реализовать соединение без пересечений в двух слоях. Для каждой цепи предварительно строится минимальное дерево и связь между слоями возможна только в точках, соответствующих выводам элементов, а неизбежные пересечения устраняются с учетом дополнительных конструктивных возможностей (проход между выводами элементов). Системе проводников на плоскости ставится в соответствие граф пересечений $\Gamma = (X, L)$, вершины которого $x \in X$ соответствуют отдельным проводникам, а ребра $l \in L$ – их пересечениям. Ищется такая двухцветная раскраска графа Γ , при которой суммарное количество ребер, соединяющих одноцветные вершины будет минимально (количество неустраненных пересечений). При этом вершины одного цвета соответствуют проводникам, расположенным в одном слое. Такая задача выделения в графе Γ максимального по числу ребер бихроматического подграфа решается методами линейного программирования.

Аналогичная задача состоит в ликвидации минимального числа проводников для получения двухслойного разложения.

Расслоение проводников сводится к получению раскраски вершин графа пересечений $U = (X, L)$ в минимальное число цветов. Особенностью задачи является то обстоятельство, что для каждой пары выводов требуется выбрать по одному пути таким образом, чтобы обеспечить разложение всей системы соединений в минимальное число слоев. Для отдельных модификаций метода Вайссмана характерно отсутствие ограничений на геометрию соединений, но реализация метода связана с большими временными затратами, увеличивающимися с ростом размерности задачи.

В силу этих обстоятельств он послужил теоретической основой для построения приближенных процедур расслоения. В ряде работ при ортогональной трассировке соединений предлагается тривиальное распределение проводников на два слоя, когда все горизонтальные отрезки помещаются в одном слое, а вертикальные – в другом. В точках изгибов соединений размещаются контактные переходы. Однако в этом случае возникает избыточное число переходов. Алгоритм дает сокращение числа переходов до 60 % по сравнению с чисто ортогональным расслоением. Получение точного решения такой задачи представляется весьма проблематичным ввиду ее большой размерности. В этой связи предложен ряд эвристических процедур минимизации числа переходов. В частности, локальная минимизация числа переходов в процессе трассировки многослойных соединений. Определенный интерес также представляют алгоритмы Хейса и Джейера, в которых процессы трассировки и расслоения совмещены. Исходя из проведенного выше анализа следует, что предварительное расслоение является эффективным для многослойных схем, в которых ограничено число межслойных переходов. В этом случае существенно сокращается время трассировки (по сравнению с процессом последовательного заполнения слоев, при котором осуществляются попытки трассировки заведомо не разводимых в данном слое соединений). Кроме того, предварительное

расслоение дает лучшее использование коммутационного поля и уменьшение числа слоев. А для двухслойных схем с ортогональной коммутацией наиболее эффективна трассировка, включающая построение совмещенной топологии схемы и последующее расслоение с минимизацией числа переходов.

В последние годы получили развитие бионические алгоритмы.

Бионические алгоритмы. Ученые не отступают от решения проблемы в виде достижения 100 % трассировки соединений печатной платы. Для этого были разработаны алгоритмы планаризации графов на основе [9, 20, 21]:

- ◆ бионических технологий;
- ◆ квантовых алгоритмов;
- ◆ генетических алгоритмов;
- ◆ алгоритм Курапова;
- ◆ алгоритм «У».

Известные методы планаризации графов, опирающиеся на то, что оптимизируемая функция обладает набором определенных качеств, например одноэкстремальностью, зачастую не справляются с решением подобных прикладных задач. Поэтому в настоящее время для этих целей используются принципиально отличающиеся от них стохастические многоагентные алгоритмы бионического класса в виде алгоритмов:

- ◆ муравьиный алгоритм (Ant Colony Optimization (ACO)),
- ◆ алгоритм умных капель (Intelligent Water Drops (IWDs)),
- ◆ генетический алгоритм (Genetic Algorithm (GA или ГА)),
- ◆ адаптивный ГА (adaptive GA),
- ◆ эвристика Лин-Кернигана для решения задач комбинаторной оптимизации.

Задача планаризации графа относится к классу NP-полных задач. Одним из методов решения задач оптимизации является локальный спуск, в частности алгоритм 3-замены (3-opt). Суть алгоритма состоит в том, что относительно текущего решения, представленного циклическим графом f со значением целевой функции $c(f)$, рассматривается его окрестность, то есть множество циклических графов, которые можно получить из f удалением не более 3х ребер и заменой другими 3-мя ребрами. Если в этом множестве существует граф g , целевая функция которого $c(g) < c(f)$, то g назначается текущим решением. Процедура повторяется до тех пор, пока текущее решение не перестанет изменяться.

Сравнительные результаты нахождения экстремального значения целевой функции для рассматриваемых алгоритмов: 3-замена, ACO, IWDs, GA, Adaptive GA, отклонение достигнутого значения от лучшего, составило, соответственно в %: 9.27; 0.22; 6.37; 14.35; 15.10.

Таким образом, для решения исходной задачи, помимо классических алгоритмов, могут быть использованы бионические алгоритмы комбинаторной оптимизации. Была исследована эффективность этих алгоритмов на задаче комбинаторики, проведен сравнительный анализ работы данных алгоритмов. Результаты исследования констатируют, что рассмотренные алгоритмы находят приближенное решение построения планарного графа.

Алгоритмы построения плоского графа. Существует ряд других алгоритмов определения плоского графа и укладки планарных графов:

1. Алгоритмы, основанные на добавлении пути («path additional algorithm»);
2. Алгоритмы, основанные на добавлении вершин («vertex additional algorithm»);
3. Алгоритм плоской укладки графов был предложен Ауслендером и Партером;
4. Хопкрофт и Тарьян смогли улучшить оценку времени работы алгоритма, предложив алгоритм на основе добавления простого пути на каждом шаге;

5. Алгоритм на основе добавления на каждом шаге новой вершины был представлен Лемпелем и Кедербаумом;
6. Алгоритм Буса и Люкера позволяет не только проверить граф на планарность, но и построить плоскую укладку на плоскости;
7. Гамма – алгоритм. Алгоритм представляет собой процесс последовательного присоединения к уложенному подграфу G' графа G новой цепи, оба конца которой принадлежат G' ;
8. Алгоритм укладки графа на плоскости на основе PQ – деревьев. Алгоритм плоской укладки графов предложили Чибой Н. и Нижезеки Т. и основан на подходе добавления на каждом шаге новой вершины графа;
9. Алгоритм для поиска st – нумерации был предложен в 1976 году Тарьяном Р. и Ивеном Ш.;
10. Алгоритм, предложенный Ивеном и Кедербаумом, который проверяет граф на планарность, используя такую структуру данных как PQ - дерево;
11. Алгоритм, предложенным Бусом и Люкером, PQ - деревья представляют все возможные перестановки и обращения элементов (вершин) баш – формы B_k .
12. Алгоритм ENTIRE – EMBEDDED, позволяем расширить укладку $A_u(v)$ графа D_u в укладку A исходного графа G .

Наблюдается приближенное решение и экспоненциальная зависимость трудоемкости выполнения алгоритмов и максимальная достижимость эффективности трассировки соединений, равная 90.1%

Экспериментальная часть. Рассмотрим классический подход к разработке печатных плат, использующих электро-радиоэлементы (ЭРЭ) с «жесткой» логикой функционирования. В начале разрабатывается принципиальная электрическая схема, а затем создается конструкция за счет решения задач размещения ЭРЭ и трассировки соединений на монтажном поле. Этот подход сложился исторически за счет того, что каждый вывод ЭРЭ несет свое функциональное значение. На основе анализа проведенного в [2, 3, 6, 9, 14, 17–19] для решения данной задачи будем использовать графо - теоретический метод, который предполагает планаризацию графа, расслоение графа на две стороны для ДПП и предварительный анализ планарности графа схемы с последующей ликвидацией пересечений, назначая конфликтное звено трассы на обратную сторону печатной платы.

Основной задачей создания топологии схемы соединений выводов ЭРЭ является необходимость расположения соединений на плоскости без пересечений, что облегчает условия проведения трасс любому трассировщику современных программ проектирования.

Задача трассировки соединений выводов элементов в схеме заключается в синтезе плоского графа схемы, не содержащего подграфов гомеоморфных K_5 или $K_{3,3}$.

В [2, 6, 14, 17–19] приведен алгоритм планаризации графа из теории характеристического управления, основанный на нахождении запрещенных фигур и переводе их из класса запрещенных в класс разрешенных.

Основным требованием, предъявляемым к системам автоматизированного проектирования плоских конструкций печатных плат с различным количеством слоев, является обеспечение 100 % эффективности трассировки соединений, под которой понимается отношение количества реализованных соединений на одном слое к общему количеству соединений.

В настоящей работе предлагается выполнить проектирование печатной платы с высокой эффективностью трассировки соединений за счет решения задачи расслоения исходного графа-схемы и построения плоского графа-схемы как на стороне установки ЭРЭ, так и на обратной стороне платы – стороне пайки, исключая запрещенные фигуры по теореме Потрягина-Куратовского [6]. Критерием является

минимизация переходных отверстий или минимизация количества проводников (ребер) на одной стороне печатной платы. Задача расслоения представляет собой задачу раскраски графа в два цвета, реализация которой основана на семантическом подходе с использованием принципов теории характеристического управления. Идея реализации подробно изложена в [6, 7, 9, 14–19], и основана на теореме Кенига, определяющей запрещенную фигуру в виде циклов нечетной длины. Граф является двухцветным тогда и только тогда, когда он не содержит циклов нечетной длины [2, 3, 14, 18, 19].

Алгоритм расслоения ребер на две стороны.

1. Поиск запрещенных фигур (циклов нечетной длины).
2. Построение семантической таблицы.
3. Нахождение минимального покрытия строк таблицы столбцами. Все строки таблицы покрыты хотя бы одним столбцом? Если да, то переход к п. 7. Иначе к п.4.
4. Нахождение компоненты запрещенной фигуры для приведения исходной модели к интерпретируемому виду.
5. Удаление компоненты из исходного графа на основании семантической таблицы минимального покрытия.
6. Переход к п.1.
7. Полученное минимальное покрытие является оптимальным решением, удаление этих компонент (сигнатур) переводит запрещенные фигуры в класс разрешенных, т.е. формирует двухцветный граф.
8. Конец алгоритма.

Рассмотрим пример преобразования графа, изображенного на рис. 1, в двухцветный. Функционал качества – минимум удаленных ребер.

По теории характеристического управления отыскиваем все запрещенные фигуры – это циклы нечетной длины. Строим семантическую таблицу (таблица1), в которой строки отражают запрещенные фигуры, а столбцы – компоненты (ребра) этих фигур.

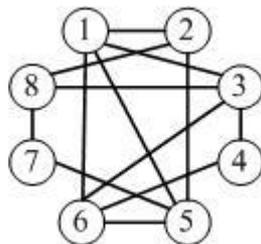


Рис. 1. Исходный граф

Минимальное покрытие строк столбцами первой таблицы указывает, какие компоненты запрещенной фигуры должны быть изменены при приведении исходной модели к интерпретируемому виду. Это компонента – ребро 38. Удаление этого ребра (рис. 2) приводит к началу алгоритма и построению второй таблицы (табл. 2). Аналогично первой таблице, здесь также находится компонента при минимальном покрытии строк столбцами (ребро 15). Удаление этого ребра (рис. 3), приводит к началу алгоритма и построению третьей таблицы (табл. 3). Минимальное покрытие в последней таблице (ребро 36) приводит к оптимальному решению – двухцветному графу (рис. 4).

Таблица 1

Семантическая таблица

Ребра З.Ф.	12	13	15	16	25	28	34	36	38	46	57	78
1251	1		1		1							
1361		1		1			1					
3463							1	1		1		
138751		1	1						1		1	1
16387521	1			1	1			1	1		1	1
283152		1	1		1	1			1			
163821	1			1		1		1	1			
16438751			1	1			1		1	1	1	1

Таблица 2

Семантическая таблица после удаления компоненты (ребро 38)

Ребра З.Ф.	12	13	15	16	25	28	34	36	46	57	78
1251	1		1		1						
1361		1		1				1			
3463							1	1	1		
157821	1		1			1				1	1

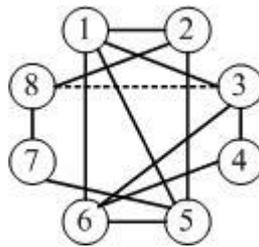


Рис. 2. Граф после удаления компоненты 38

Таким образом, ребра 38, 15, 36 переводят запрещенные фигуры (циклы нечетной длины) в класс разрешенных, а исходный граф к двухцветному виду. Этот процесс на много порядков менее трудоёмок, чем процесс фактической генерации всех эквивалентных структур при поиске минимального решения известными подходами [2, 3, 9, 11, 14–19]. Трудоемкость алгоритма не превышает полином 5 степени при достижении точного решения.

При проектировании двухсторонних печатных плат разработана методика построения планарных графов и расслоения графа на две стороны печатной платы с уменьшением количества неразведенных ребер.

Таблица 3

Семантическая таблица после удаления очередной компоненты

Ребра З.Ф.	13	16	34	36	46
1361	1	1		1	
3463			1	1	1

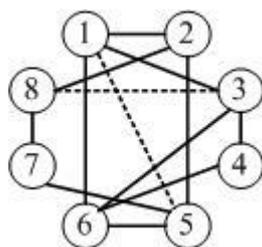


Рис. 3. Граф после очередного удаления компоненты



Рис. 4. Плоский граф: а – со стороны пайки; б – со стороны установки ЭРЭ

Основным критерием эффективности построения плоских структур является 100 % трассировка соединений между элементами структуры в одном или нескольких слоях. Оценим результаты синтеза плоских структур электронных схем, построенных с применением разработанной модели и алгоритма. Для проведения эксперимента по трассировке соединений использовался современный пакет прикладных программ Altium Designer (P-CAD) со специализированным программным обеспечением (СПО).

Проведенный сравнительный анализ, представленных результатов трассировки (возможность 100 % трассировки) применяемых САПР, полученных «До» (без участия планаризации) и «После» (планаризации) использования предлагаемого подхода планаризации исходных графов для проектирования плоских структур электронных схем, позволяет повысить эффективность трассировки соединений в среднем на 5–15 %. Информация представлена в табл. 4, а на рис. 5 показана зависимость эффективности трассировки (в процентах) в обычном режиме и после проведения планаризации относительно установленной на предприятии нормированной трудоемкости выполнения работ, связанной с размещением, трассировкой и последующей доработкой. Количество связей в исходной схеме на момент проведения исследований – 920 шт.

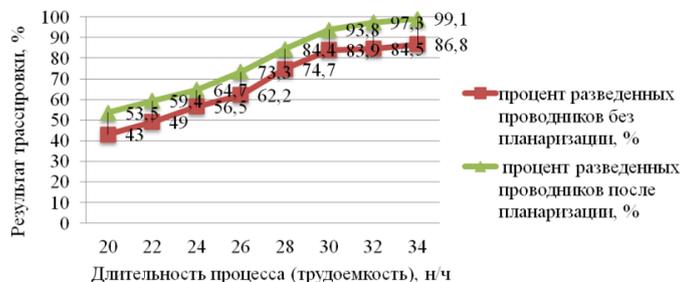


Рис. 5. График зависимости трассировки в обычном режиме и после проведения планаризации относительно длительности процесса

Таблица 4

Зависимость результата трассировки без планаризации и с планаризацией

N	Время процесса (трудоемкость), н/ч	Процент разведенных проводников без планаризации, %	ПРОЦЕНТ разведенных проводников после планаризации, %
1	20	43	53,5
2	22	49	59,4
3	24	56,5	64,7
4	26	62,2	73,3
5	28	74,7	84,4
6	30	83,9	93,8
7	32	84,5	97,3
8	34	86,8	99,1

Заключение. При проектировании двухсторонних печатных плат разработана методика построения планарных графов и расслоения графа на две стороны печатной платы с уменьшением количества неразведенных ребер, основанная на теории характеристического управления. Трудоемкость получения точного решения задачи принимает вид полиномиальной зависимости не выше 5-й степени и позволяет получить результат за приемлемое время при этом эффективность трассировки вырастает на 5–15 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Алексеев О.В., Головкин А.А., Пивоваров И.Ю. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств. – М.: Высшая школа, 2000. – 479 с.
2. Горбатов В.А. Фундаментальные основы дискретной математики. Информационная математика. – М.: Наука, Физматлит, 2000. – 544 с.
3. Горбатов В.А., Смирнов М.И., Хлытчиев И.С. Логическое управление распределенными системами. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 287 с.
4. Шейн А.Б., Лазарева Н.М. Методы проектирования электронных устройств. – М.: Инфра-инженерия, 2011. – 456 с.
5. Муромцев Д.Ю., Тюрин И.В., Белоусов О.А., Курносков Р.Ю. Проектирование функциональных узлов и модулей радиоэлектронных средств. – СПб.: Лань, 2018. – 251 с.
6. Берг К. Теория графов и ее применение. – М.: Иностранная литература, 1962. – 320 с.
7. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: МГТУ им. Баумана, 2009. – 430 с.
8. Юрков Н.К. Технология радиоэлектронных средств. – Пенза: ПГУ, 2012. – 640 с.
9. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Дискретная математика. – М.: Физматлит, 2014. – 496 с.
10. Курейчик В.М., Лебедев О.Б., Лебедев Б.К. Поиск адаптации. – М.: Физматлит, 2006. – 270 с.
11. Петров Ю.В. Методы математического моделирования радиотехнических систем. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2005. – 111 с.
12. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат. – М.: Форум, 2005. – 559 с.
13. Муромцев Ю.Л., Муромцев Д.Ю., Тюрин И.В. Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств. – М.: Академия, 2010. – 384 с.
14. Потапов В.И., Сускин В.В., Шевченко В.Ф. Теория характеристического управления в конструировании плоских структур радиоэлектронных средств. – Рязань: ООО «Эко-текст», 2017. – 92 с.
15. Потапов В.И., Сускин В.В. Об одном подходе к синтезу плоских структур электронных средств с жесткой логикой функционирования // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2016. – № 56. – С. 83-89.

16. *Потапов В.И., Сускин В.В.* Модели и алгоритмы проектирования плоских структур электронных средств на основе гибкой элементной базе // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2017. – № 62. – С 79-88.
17. *Потапов В.И.* Задача синтеза структуры электронных модулей, построенных с использованием принципов характеризационного управления // Сб. статей Всероссийской научно-практической конференции «Стратегия научно-технологического развития России: проблемы и перспективы реализации. МЦНП «Новая наука». – Петрозаводск, 2020. – С. 18-30.
18. *Потапов В.И., Сускин В.В., Филаткин С.В.* Принцип построения плоских конструкций электронных схем с учетом запрещенных фигур // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE), 2020.
19. *Потапов В.И.* Запрещенные фигуры в проектировании конструкций электронных модулей // XXV Юбилейная Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях (НИТ-2020): Тез. докл. Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2020.
20. *Гуменникова А.В., Емельянова М.Н., Семенкин Е.С., Сонов Е.А.* Об эволюционных алгоритмах решения сложных задач оптимизации // Вестник СибГАУ. – 2003. – № 4. – С. 14-23.
21. *Онищенко Т.Ю., Марасанов В.В.* Характеризационный анализ как оптимизационный метод контроля и прогнозирования работоспособности электронных схем // Вестник ХНТУ. – 2013. – № 3. – С. 12-19.

REFERENCES

1. *Alekseev O.V., Golovkov A.A., Pivovarov I.Yu.* Avtomatizatsiya proektirovaniya radioelektronnykh sredstv [Automation of design of radio-electronic means]. Moscow: Vysshaya shkola, 2000, 479 p.
2. *Gorbatov V.A.* Fundamental'nye osnovy diskretnoy matematiki. Informatsionnaya matematika [Fundamental foundations of discrete mathematics. Information Mathematics]. Moscow: Nauka, Fizmatlit, 2000, 544 p.
3. *Gorbatov V.A., Smirnov M.I., Khlytchiev I.S.* Logicheskoe upravlenie raspredelennymi sistemami [Logical management of distributed systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 287 p.
4. *Shein A.B., Lazareva N.M.* Metody proektirovaniya elektronnykh ustroystv [Design methods for electronic devices]. Moscow: Infra-inzheneriya, 2011, 456 p.
5. *Muromtsev D.Yu., Tyurin I.V., Belousov O.A., Kurnosov R.Yu.* Proektirovanie funktsional'nykh uzlov i moduley radioelektronnykh sredstv [Design of functional units and modules of radio-electronic means]. Saint Petersburg: Lan', 2018, 251 p.
6. *Berzh K.* Teoriya grafov i ee primeneniye [Graph theory and its application]. Moscow: Inostrannaya literatura, 1962, 320 p.
7. *Norenkov I.P.* Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya [Computer-aided design basics]. Moscow: MGTU im. Bauman, 2009, 430 p.
8. *Yurkov N.K.* Tekhnologiya radioelektronnykh sredstv [The technology of radio electronic means]. Penza: PGU, 2012, 640 p.
9. *Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M.* Diskretnaya matematika [Discrete Mathematics]. Moscow: Fizmatlit, 2014, 496 p.
10. *Kureychik V.M., Lebedev O.B., Lebedev B.K.* Poiskovaya adaptatsiya [Search adaptation]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 270 p.
11. *Petrov Yu.V.* Metody matematicheskogo modelirovaniya radiotekhnicheskikh system [Methods of mathematical modeling of radio engineering systems]. Saint Petersburg: Balt. gos. tekhn. un-t, 2005, 111 p.
12. *Pirogova E.V.* Proektirovanie i tekhnologiya pechatnykh plat [Design and technology of printed circuit boards]. Moscow: Forum, 2005, 559 p.
13. *Muromtsev D.Yu., Tyurin I.V.* Informatsionnye tekhnologii proektirovaniya radioelektronnykh sredstv [Information technologies for designing radio-electronic equipment]. Moscow: Akademiya, 2010, 384 p.
14. *Potapov V.I., Suskin V.V., Shevchenko V.F.* Teoriya kharakterizatsionnogo upravleniya v konstruirovani ploskikh struktur radioelektronnykh sredstv [Theory of characterization control in the design of flat structures of radioelectronic devices]. Ryazan': OOO «Eko-tekst», 2017, 92 p.

15. Potapov V.I., Suskin V.V. Ob odnom podkhode k sintezu ploskikh struktur elektronnykh sredstv s zhestkoy logikoy funktsionirovaniya [About one approach to the synthesis of planar structures of electronic devices with function of rigid logic], *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University], 2016, No. 56, pp. 83-89.
16. Potapov V.I., Suskin V.V. Modeli i algoritmy proektirovaniya ploskikh struktur elektronnykh sredstv na osnove gibkoy elementnoy baze [Models and algorithms for designing flat structures of electronic devices based on a flexible element base], *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University], 2017, No. 62, pp. 79-88.
17. Potapov V.I. Zadacha sinteza struktury elektronnykh moduley, postroennykh s ispol'zovaniem printsipov kharakterizatsionnogo upravleniya [The task of synthesizing the structure of electronic modules built using the principles of characterization management], *Sb. statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Strategiya nauchno-tehnologicheskogo razvitiya Rossii: problemy i perspektivy realizatsii. MTSNP «Novaya nauka»* [Collection of articles of the all-russian scientific and practical conference " strategy of scientific and technological development of Russia: problems and prospects of implementation. MCNP "New science"]. Petrozavodsk, 2020, pp. 18-30.
18. Potapov V.I., Suskin V.V., Filatkin S.V. Printsip postroeniya ploskikh konstruksiy elektronnykh skhem s uchedom zapreshchennykh figur [The principle of constructing flat structures of electronic circuits taking into account forbidden figures], *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE)*, 2020.
19. Potapov V.I. Zapreshchennye figury v proektirovanii konstruksiy elektronnykh moduley [Prohibited figures in the design of electronic module structures], *XXV Yubileynaya Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya studentov, molodykh uchenykh i spetsialistov «Novye informatsionnye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh (NIT-2020): Tez. dokl. Ryazan. gos. radiotekhn. un-t. Ryazan', 2020* [XXV Anniversary All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Young Scientists and Specialists " New Information Technologies in Scientific Research (NIT-2020): Abstracts of reports of the Ryazan State Radio Engineering University. Ryazan, 2020].
20. Gumennikova A.V., Emel'yanova M.N., Semenkin E.S., Sopov E.A. Ob evolyutsionnykh algoritmakh resheniya slozhnykh zadach optimizatsii [On evolutionary algorithms for solving complex optimization problems], *Vestnik SibGAU* [Vestnik. SibGAU], 2003, No. 4, pp. 14-23.
21. Onishchenko T.Yu., Marasanov V.V. Kharakterizatsionnyy analiz kak optimizatsionnyy metod kontrolya i prognozirovanie rabotosposobnosti elektronnykh skhem [Characterization analysis as an optimization method for monitoring and predicting the performance of electronic circuits], *Vestnik KhNTU* [Vestnik HNTU], 2013, No. 3, pp. 12-19.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Р.В. Шевченко.

Потапов Вадим Игоревич – Филиал АО «РКЦ «Прогресс – ОКБ «Спектр»; e-mail: v.i.potapov@mail.ru; 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59а; тел.: +79056934100; начальник опытно-экспериментального производства.

Potapov Vadim Igorevich – Joint stock company "Rocket space center "Progress" – branch special design Bureau "SPECTR"; e-mail: v.i.potapov@mail.ru; 59a, Gagarina street, Ryazan, 390005, Russia; phone: +79056934100; head of the experimental production.