

УДК 681.324

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К СИНТЕЗУ ПЛОСКИХ СТРУКТУР ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С ЖЕСТКОЙ ЛОГИКОЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

В. В. Сускин, д.т.н., профессор кафедры САПР ВС РГРТУ, vsuskin@mail.ru;

В. И. Потапов, нач. опытно-экспериментального производства филиала АО «РКЦ «Прогресс – ОКБ «Спектр», v.i.potapov@mail.ru

Рассматривается задача синтеза плоских структур электронных средств с жесткой логикой функционирования на этапе структурного проектирования. Целью работы является необходимость расположения соединений на плоскости без пересечений, что облегчает условия проведения трасс любому трассировщику современных программ проектирования. Основным недостатком всех используемых алгоритмов является заложенный в них принцип последовательного и фрагментарного просмотра коммутационного пространства. Для решения данной задачи будем использовать графотеоретический метод теории характеризационного управления, а не топографический метод, где приоритет отдается метрическому аспекту задачи. Графотеоретический метод предполагает предварительный анализ планарности графа схемы с последующей ликвидацией пересечений при использовании соответствующих технологических приемов.

Ключевые слова: плоские структуры электронных средств, граф, ребро графа, графотеоретический подход, планарность, запрещенные фигуры, алгоритм, анализ, синтез, трассировка.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-83-89

Введение

Синтез структуры электронного средства плоского типа является одной из самых сложных задач на этапе структурного проектирования. Задача в такой постановке особенно актуальна для бортовых ЭС, выполненных по технологии поверхностного монтажа, где, например, по причине металлического теплоотвода или керамического основания, структура соединений возможна только в одном слое.

Для её решения предложено большое число различных алгоритмов [1-3], однако ни один из них не может практически реализовать тактику и стратегию человека-разработчика. Основным недостатком всех используемых алгоритмов 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.

Теоретическая часть

Рассмотрим классический подход к разработке плоских структур ЭС, использующих электрорадиоэлементы (ЭРЭ) с жесткой логикой

функционирования. Вначале 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 [4], для решения данной задачи будем использовать графотеоретический метод, а не топографический метод, где приоритет отдается метрическому аспекту задачи. Графотеоретический метод предполагает предварительный анализ планарности графа схемы с последующей ликвидацией пересечений, используя соответствующие технологические приемы. Этими технологическими приемами могут быть: перемычки, программирование выводов компонентов в ПЛИС-технологии и т.п. Покажем, как можно применить графотеоретический подход к синтезу плоской структуры ЭС, построенной на жесткой элементной базе.

Основной задачей создания структурной схемы соединений выводов ЭРЭ является необходимость расположения соединений на плоскости без пересечений, что облегчает условия проведения трасс любому трассировщику современных программ проектирования, таким как Sрес-

ctra, OrCAD, P-CAD, ACCELEDA и т.д.

Дадим определение. Назовем чертежом Γ графа $G=(X,U)$ изображение графа G на плоскости, если его ребра пересекаются только в вершинах $x \in X$. На рисунке 1 представлены примеры плоского и неплоского чертежей графа.

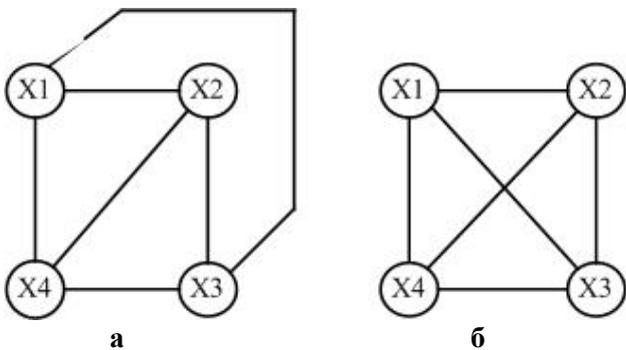


Рисунок 1 – Чертеж графа:
а – плоский; б – неплоский

Среди критериев планарности графа наиболее известен критерий Понтрягина – Куратовского [5].

Теорема 1. Граф планарен тогда и только тогда, когда он не содержит подграфов, гомеоморфных графам G_5 или $G_{3,3}$ (рисунок 2).

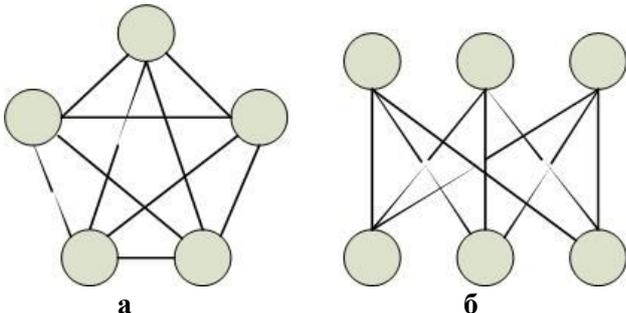


Рисунок 2 – Графы Понтрягина - Куратовского:
а – G_5 ; б – $G_{3,3}$

Определение. Два подграфа G_1 и G_2 гомеоморфны, если они становятся идентичными (изоморфными) с точностью до вершин степени 2, т.е. при многократном использовании двух операций: подразбиение ребер и ликвидация вершин степени 2 (рисунок 3).

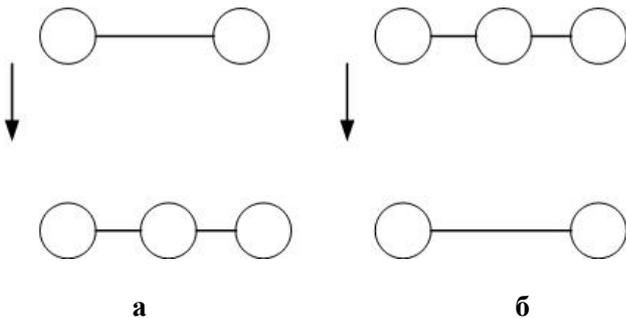


Рисунок 3 – Инварианты планарности:
а – подразбиение ребер;
б – ликвидация вершин степени 2

Основываясь на критерии Понтрягина, можно получить еще один критерий планарности, если ввести понятие элементарного стягивания, которое состоит в следующем. При стягивании любого ребра графа оно выбрасывается, а обе вершины a и b (рисунок 4), коинцидентные ему, отождествляются тем же ребрам, что и a, b (кроме ребра, которое выброшено). Тогда возникает теорема [6].

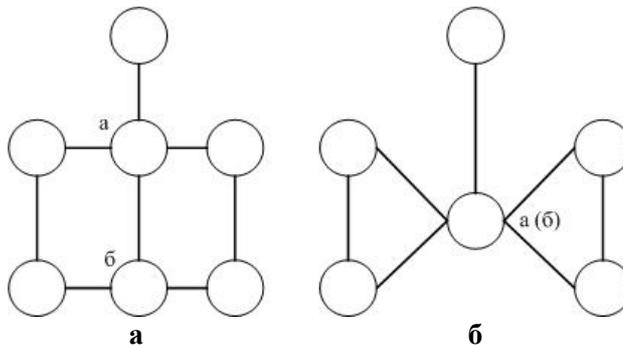


Рисунок 4 – Элементарное стягивание:
а – исходный граф;
б – граф после стягивания

Теорема 2. Граф планарен тогда и только тогда, когда он не содержит подграфов, стягиваемых к G_5 и $G_{3,3}$.

Таким образом, задача соединения выводов элементов в схеме заключается в синтезе графа схемы, не содержащего подграфов, гомеоморфных G_5 или $G_{3,3}$.

Для решения этой задачи необходимо учитывать конструктивно-технологические параметры корпуса ЭРЭ и их выводов, которые, собственно, и определяют ограничения на построение структуры соединений. Прежде всего, к ним относятся:

- порядок расположения конструктивных выводов;
- возможность прохода соединений между ними.

В связи с особенностями выводов ЭРЭ уточним графовую модель схемы. Пусть дана схема, в которой E – множество ЭРЭ, C – множество выводов, V – множество цепей схемы. Для учета вышеуказанных ограничений элементы $e_i \in E$ будем представлять специальными (модельными) графами G_i (моделями элементов).

Сформулируем следующие требования к моделям элементов:

- граф G_i планарен;
- любой чертеж Γ_i графа G_i должен сохранять порядок следования выводов элементов для ЭРЭ с жесткой структурой;
- в любом плоском представлении схемы чертеж Γ_i должен быть расположен в области, не содержащей моделей других элементов;

- модель элемента должна полностью описывать возможности подхода соединений к выводам элемента;
- модель элемента должна учитывать возможности прохода соединений между выводами.

Общая модель схемы представляет собой граф $G = G_1 \cup G_v$, где G_v – граф электрических цепей схемы.

Все современные Soft-продукты описывают принципиальную схему в виде списка цепей. Поэтому любую цепь $v \in V$ с размером p будем представлять в виде дерева типа «звезда».

Для построения моделей ЭРЭ рассмотрим некоторые свойства планарных графов [7]. Пусть имеется плоский чертеж Γ планарного графа G . Область плоскости, ограниченная ребрами и не содержащая ни вершин, ни ребер, называется гранью. Ребра, ограничивающие грань, образуют цикл. У плоского чертежа имеется одна бесконечная (внешняя) грань. Для любого плоского чертежа Γ имеет место формула Эйлера: $n - r + f = 2$, где n – число вершин, r – число ребер, а f – число граней.

Для планарного графа $G = (X, U)$ справедливы следующие утверждения.

1. Всякая грань плоского чертежа Γ графа G может быть внешней гранью некоторого плоского чертежа Γ^* . Указанное преобразование достигается путем стереографической проекции, если центр проекции разместить внутри этой грани.

2. Пусть Γ – плоский чертеж графа G и C – некоторый цикл. Чертеж Γ^* , полученный переносом всех внутренних относительно C подграфов во внешнюю область цикла C и наоборот, также является плоским (рисунок 5).

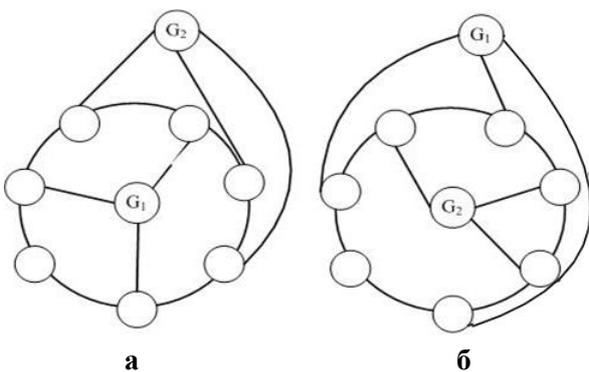


Рисунок 5 – Преобразование чертежа: а – чертеж Γ ; б – чертеж Γ^*

Теорема 3. Необходимым и достаточным условием того, чтобы некоторый цикл $C = \{x_1, x_2, \dots, x_r\}$ графа G был внешней гранью какого-либо чертежа Γ , является то, чтобы граф $G^* = G \cup \{x_0\} \cup \{u(x_0, x_i), i = 1, r\}$, где x_0 – некоторая дополнительная вершина, а $u(x_0, x_i)$ – ребра, был бы планарен.

Доказательство. Пусть C – внешняя грань, тогда, не нарушая планарности, можно связать вершину x_0 со всеми вершинами цикла C (рисунок 6). Необходимость доказана. Условие достаточно, поскольку, если G^* планарен, то единственными подграфами во внешней области цикла C могут быть подграфы, связывающие две соседние вершины C . Ликвидация вершины вместе с инцидентными ей ребрами и перенос указанных подграфов внутрь цикла C приводит к получению плоского чертежа с внешней гранью C (рисунок 6, б).

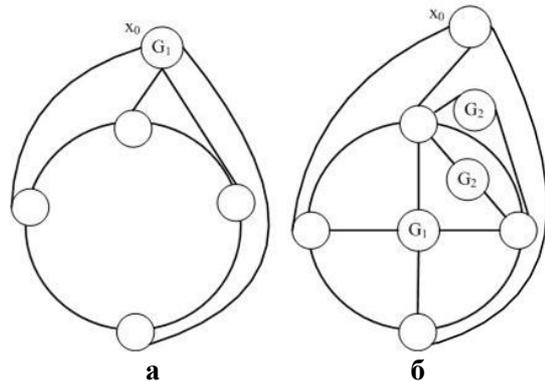


Рисунок 6 – Иллюстрация утверждения 3: а – плоский чертеж без нарушения планарности; б – плоский чертеж с внешней гранью

3. Необходимым и достаточным условием того, чтобы множество вершин $X_1 \subset X$ графа $G = (X, U)$ размещалось на внешней грани какого-либо плоского чертежа Γ , является то, чтобы граф G^* , полученный из G путем добавления вершины x_0 и соединения ее со всеми вершинами из X_1 , был бы планарен. А это возможно всегда, когда можно получить цикл C , проходящий через вершины X_1 .

4. Необходимым и достаточным условием того, чтобы множество вершин $X_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ графа $G = (X, U)$ размещалось на внешней грани какого-либо плоского чертежа Γ в заданном порядке, является то, чтобы граф $G^* = G \cup \{x_0\} \cup \{u(x_0, x_i), i = 1, n\} \cup C(x_1, \dots, x_n)$ был бы планарен (рисунок 7).

5. Пусть вершины множества $X_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ должны быть расположены на внешней грани плоского чертежа Γ графа $G = (X, U)$, причем некоторые из них должны следовать (x_1, x_2, \dots, x_k) в заданном порядке.

Необходимое и достаточное условие выполнения этого размещения состоит в том, чтобы граф $G^* = G \cup \{x_0\} \cup \{u(x_0, x_i), i = k+1, n\} \cup \{u(x_i), i = 1, k\} \cup \{u(x_0, x_i^*), i = 1, k\} \cup \{u(x_i^*, x_i), i = 1, k\} \cup \{u(x_i^*, x_{i+1}^*), i = 1, k-1\}$ был бы планарен. Пример реализации условия приведен на рисунке 8.

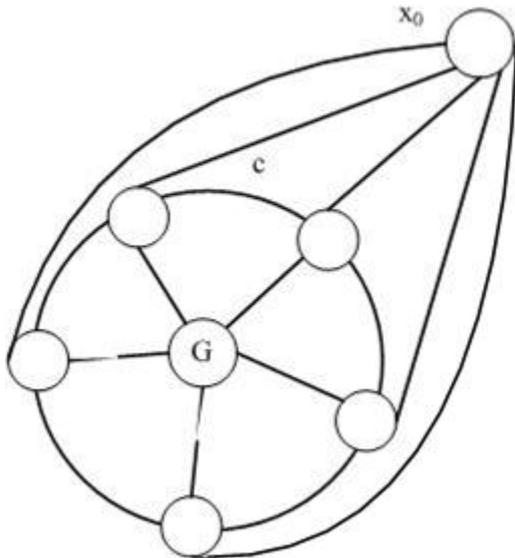


Рисунок 7 – Утверждение 5

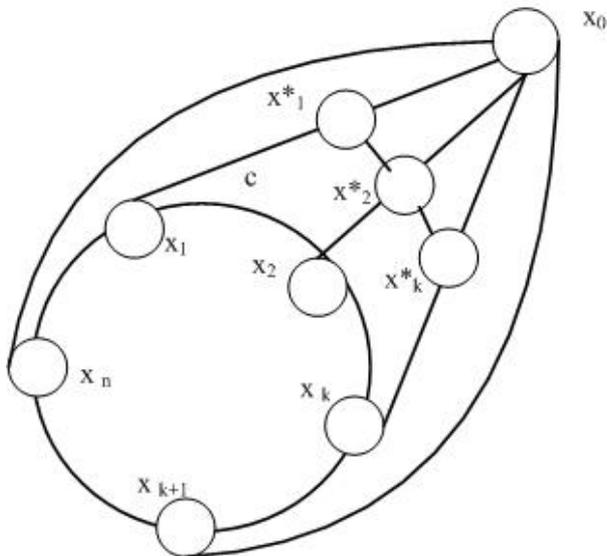


Рисунок 8 – Иллюстрация утверждения 6

Рассмотрим элементы $e_i \in E$ с множеством выводов $C_i = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ как K -полюсники, порядок расположения выводов которых, вообще говоря, задан. Если область, занимаемая элементом e_i , является запрещенной для расположения других элементов и соединений (под элементом нельзя выполнить трассировку), то естественно, что в любом плоском чертеже схемы множества c_i ($i = 1, n$) лежат на некоторых гранях этого чертежа. Поэтому в соответствии со свойствами 1 – 5 в качестве модели элемента e_i следует принять “звезду” (рисунок 9, а) при неупорядоченном наборе выводов и возможности проведения трасс между ними, «колесо» (рисунок 9, б), когда задан порядок расположения выводов. Пример частичной упорядоченности выводов представлен моделью на рисунке 9, в.

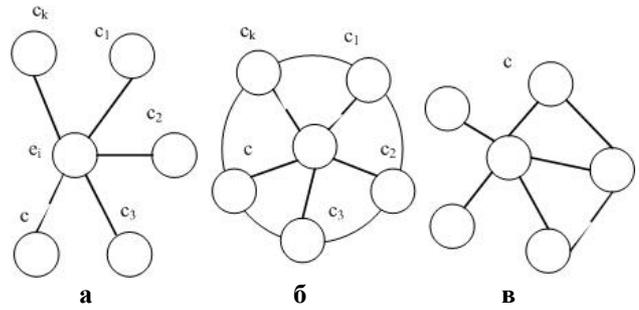


Рисунок 9 – Модели элементов:

а – «звезда»; б – «колесо»

в – «с частичной упорядоченностью выводов»

Ребра графа G , относящиеся к моделям элементов, будем называть модельными, а ребра соединений – сигнальными. Тогда граф $G = (X, U)$ определяется множеством вершин $X = E \cup C$ и множеством ребер $U = M \cup W$, где E – множество элементов, C – множество выводов элементов, M – модельные, а W – сигнальные ребра. Таким образом, для описания принципиальной схемы необходима модель в виде графа, комбинированного графа, содержащего модельные и сигнальные ребра.

Практическая часть

Рассмотрим фрагмент схемы (рисунок 10), состоящий из двух микросхем $D1, D2$, резисторов $R1 - R3$. Для всех элементов задан порядок расположения выводов. Пусть прохождение проводников под микросхемами недопустимо вследствие малого шага между выводами и отсутствия соответствующей технологии, например техники тонких проводников [8]. Для исследования планарности графа G можно предварительно провести следующие упрощения: ликвидировать висячие вершины и инцидентные им ребра; ликвидировать вершины степени 2, заменяя два ребра одним; заменить все кратные ребра одним ребром.

Проведенные упрощения не изменяют планарности исходного графа G . В результате получим граф (рисунок 11) для схемы (рисунок 10).

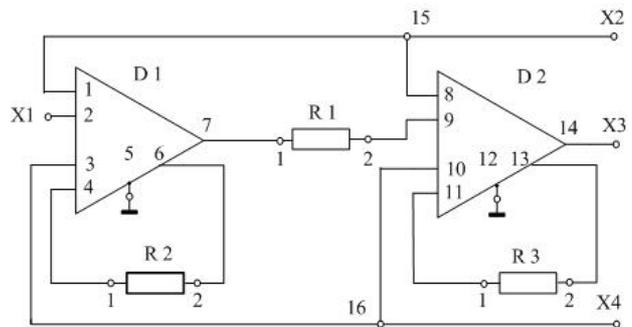
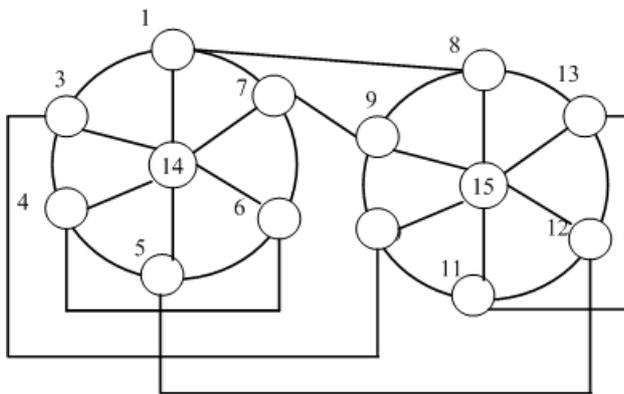
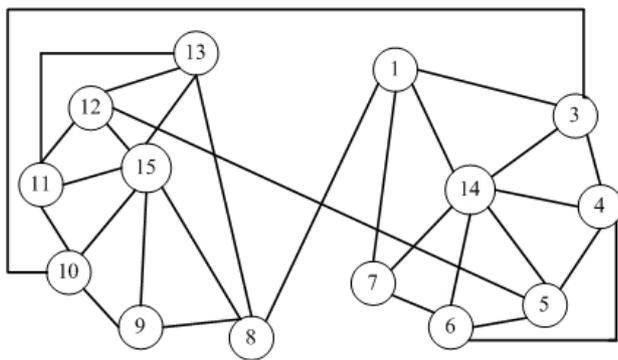


Рисунок 10 – Фрагмент схемы



а



б

Рисунок 11 – Граф-схемы:
а – частный вид; б – общий вид

Согласно критерию Понтрягина, этот граф является не планарным, поскольку содержит подграфы, гомеоморфные графу $G_{3,3}$ и подграфы, гомеоморфные графу G_5 .

Используя теорию характеристического управления [6], можно определить, какие ребра необходимо удалить для преобразования исходного графа схемы в планарный. Для этого выделим все запрещенные фигуры (графы $G_{3,3}$ и G_5) и построим двумерную матрицу, каждая строка которой взаимно однозначно соответствует запрещенной фигуре Q_i (подграфу $G_{3,3}$ и G_5), а столбец – ребру P_j . Тогда покрытие строк столбцами этой матрицы определит, какие ребра необходимо удалить для приведения графа к планарному виду. Минимальное покрытие будет соответствовать минимальному решению, так как удаление любого ребра выводит запрещенную фигуру ($G_{3,3}$; G_5) из класса подграфов, гомеоморфных $G_{3,3}$ или G_5 , т.е. из класса запрещенных в класс разрешенных.

Матрица для рассматриваемого графа имеет вид:

| № фигу- ры | P_i | | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|--------|---------|-------|
| | Q_i | {1,8} | {7,9} | {5,12} | {11,13} | {4,6} |
| $G_{3,3}^1$ | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 |
| $G_{3,3}^2$ | 1 | | 1 | 1 | | 1 |
| $G_{3,3}^3$ | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 |
| $G_{3,3}^4$ | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| G_5^1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 |
| G_5^2 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 |
| G_5^3 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 |
| G_5^4 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 |

Минимальное покрытие содержит только одно ребро $\{5, 12\}$. После удаления ребра $\{5, 12\}$ получаем планарный граф, плоское представление которого изображено на рисунке 11, б. Соединение, которое соответствует удаленному ребру $\{5, 12\}$ (показано жирной линией), реализуется с помощью технологической перемычки или переносится на вторую плоскость. Толщина графа G равна 2. Для трассировки данной схемы необходимо использовать как минимум двухстороннюю печатную плату или одностороннюю с установкой технологической перемычки.

Оценим результаты синтеза плоских структур ЭС, построенных с применением теории характеристического управления. Основным критерием эффективности построения плоских структур является 100%-ная трассировка соединений между элементами структуры в одном слое. Для проведения эксперимента по трассировке соединений использовались современные пакеты прикладных программ: P-CAD, AccelEda, Or-CAD, Specstra. Схемы генерировались как для аналоговых, так и для цифровых устройств РЭС. Всего в испытаниях участвовало 250 схемно-конструктивно-технологических решений.

Сравнение по качеству трассировки (возможность 100%-ной трассировки) проводилось без применения и с применением алгоритма планаризации (рисунок 12). Применялась технология поверхностного монтажа элементов на поверхность печатной платы.

Как видно из экспериментальных результатов, планаризация графа схемы позволяет облегчить условия трассировки современным пакетам программ, повысить на 30 % возможность получения 100 % соединений при реализации печатного монтажа на печатной плате.

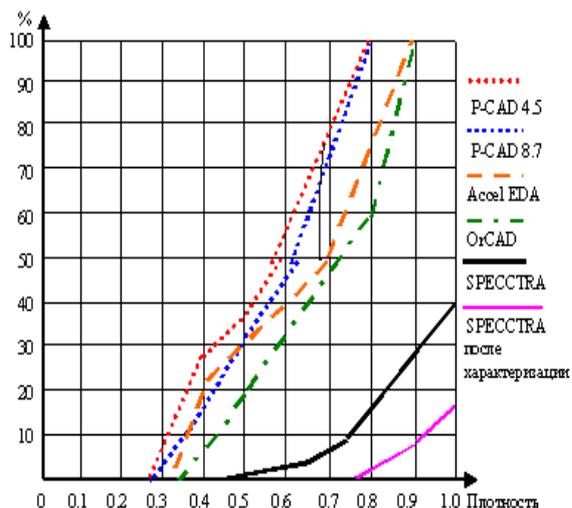


Рисунок 12 – Зависимость процента не разведенных проводников от плотности монтажа для односторонней ПП с СНР-компонентами

Выводы

Предлагаются математические модели электрорадиоэлементов в виде жесткой элементной базы, где порядок следования выводов элементов задан заранее. Разработана методика по-

строения планарных графов, основанная на теории характеристического управления, позволяющая сократить время поиска оптимального решения за счет нахождения запрещенных фигур и перевода их из класса запрещенных в класс разрешенных.

Библиографический список

1. Селютин В. А. Машинное конструирование электронных устройств. М.: Сов. радио, 1977, 378 с.
2. Дендобренко Б. Н., Малика А. С. Автоматизация конструирования РЭА. М.: Высш.шк., 1980, 384 с.
3. Петренко А. И., Тетельбаум А. Я. Формальное конструирование ЭВА. М.: Сов.радио, 1979, 253 с.
4. Сускин В. В. Оптимизация ПЛИС-технологии // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2003. № 4. С. 6 – 14.
5. Зыков А. А. Теория графов. Новосибирск.: Наука, 1969, 384 с.
6. Горбатов В. А. Основы дискретной математики. М.: Высш. Школа, 1986, 311 с.
7. Берж К. Теория графов и ее применение. М.: Иностранная литература, 1962, 320 с.
8. Сускин В. В. Основы технологии поверхностного монтажа. Рязань.: Узорчье, 2001, 160 с.

UDC 681.324

ABOUT ONE APPROACH TO THE SYNTHESIS OF ELECTRONIC DEVICES PLANAR STRUCTURES WITH FUNCTION OF RIGID LOGIC

V. V. Suskin, PhD (technical sciences), professor, RSREU, Ryazan, vsuskin@mail.ru;

V. I. Potapov, head of the experimental production, Joint stock company "Rocket space center "Progress" – branch special design Bureau "SPECTR", Ryazan, v.i.potapov@mail.ru

The problem of synthesis of flat structures of electronic means with rigid logic of functioning at the stage of structural design is considered. The purpose of work is a necessity to arrange the connections on the plane without crossings that facilitates conditions of carrying out routes to any tracer of modern programs design. The main lack of all used algorithms is the principle of consecutive and fragmentary viewing of switching space underlain in them. For the solution of this task we will use the graph - theoretical method of the theory of characterization management, but not a topographical method where the priority is given to metric aspect of a task. The graph - theoretical method assumes the preliminary analysis of planarity of a flowgraph with the subsequent elimination of crossings, using the corresponding processing methods.

Key words: flat structures of electronic means, graph, an edge of the graph, graph - theoretical approach, planarity, forbidden figures, algorithm, analysis, synthesis, trace.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-83-89

References

1. **Seljutin V. A.** *Mashinnoe konstruirovanie jektronnyh ustrojstv* (Machine construction of electronic devices). Moscow: Sov. radio, 1977, 378 p. (in Russian).
2. **Dendobrenko B. N., Malika A. S.** *Avtomatizacija konstruirovaniya RJeA* (Automation design REA). Moscow: Vyssh.shk., 1980, 384 p. (in Russian).
3. **Petrenko A. I., Tetelbaum A. Ja.** *Formalnoe konstruirovanie JeVA* (Formal design of EVA). Moscow: Sov.radio, 1979, 253 p. (in Russian).
4. **Suskin V. V.** *Optimizacija PLIS-tehnologii. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrolya, diagnostika.*

2003, no. 4, pp. 6-14 (in Russian).

5. **Zykov A. A.** *Teorija grafov* (Graph theory). Novosibirsk: Nauka, 1969, 384 p. (in Russian).
6. **Gorbatov V. A.** *Osnovy diskretnoj matematiki* (Foundations of discrete mathematics). Moscow: Vysshya Shkola, 1986, 311 p. (in Russian).
7. **Berzh K.** *Teorija grafov i ee primenenie* (Graph theory and its application). Moscow: Inostrannaja literatura, 1962, 320 p. (in Russian).
8. **Suskin V. V.** *Osnovy tehnologii poverhnostnogo montazha* (The basics of surface mount technology). Rjazan: Uzoroche, 2001, 160 p. (in Russian).