

На правах рукописи



**Потапов Вадим Игоревич**

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ НАЗЕМНОЙ КОНТРОЛЬНО - ПРОВЕРОЧНОЙ  
АППАРАТУРЫ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО - КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования  
(технические системы)»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2021

Работа выполнена на кафедре САПР ВС в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

Научный руководитель: **Сускин Виктор Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры САПР ВС ФГБОУ ВО «Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина», г. Рязань

Официальные оппоненты: **Курейчик Виктор Михайлович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры систем автоматизированного проектирования Института компьютерных технологий и информационной безопасности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, г. Таганрог

**Юрков Николай Кондратьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» факультета информационных технологий и электроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет», заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, г. Пенза

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет»

Защита диссертации состоится «25» марта 2021 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.02 в ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина», а также на сайте ФГБОУ ВО «РГРТУ им. В. Ф. Уткина» [www.rsgeu.ru](http://www.rsgeu.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, доцент



Перепелкин  
Дмитрий Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы и ее значимость.** Основным требованием, предъявляемым к системам автоматизации проектирования электронных модулей контрольно-проверочной аппаратуры изделий ракетно-космической техники (РКТ), является повышение эффективности трассировки соединений, под которой понимается отношение количества реализованных соединений на одном слое к общему количеству соединений. Данное условие необходимо выполнять, например, при разработке электронных средств контрольно-проверочной аппаратуры опытных образцов изделий ракетно-космической техники, включая проектирование коммутационного пространства для тонкопленочных гибридных схем, проектирование односторонних, двухсторонних, многослойных печатных плат с ПЛИС и ВГА-компонентами, выполненных по технологии поверхностного монтажа, где, по причине металлического теплоотвода или керамического основания, структура соединений возможна только в одном слое.

**Степень разработанности темы диссертации.** Имеется обширная библиография по этому вопросу. Для решения задачи синтеза плоских конструкций электронных модулей разработано большое число различных подходов, которые предложили ученые: Глушков В.М., Дендобренко Б.Н., Корячко В.П., Курейчик В.М., Юрков Н.М., Галецкий Ф.П., Мелихов А.Н., Норенков И.П., Понтрягин Л.С., Селютин В.А., Яншин А.А., М.Брейер, Мылов Г.В. и др.

Основным недостатком всех используемых методов и алгоритмов является заложенный в них принцип последовательного и фрагментарного просмотра коммутационного пространства, что приводит к увеличению трудоемкости решения и получению приближенного значения критерия качества и, как следствие, отсутствию 100 % - й эффективности трассировки соединений в одном слое. Сложность и высокая трудоемкость алгоритмов синтеза подобных структур обусловлены также необходимостью учета большого числа различных требований, связанных со спецификой их изготовления и особенностями разрабатываемого конструктивно-технологического решения.

Современные конструкции электронных модулей (ЭМ) в своих схемных решениях кроме обычных дискретных элементов применяют интегральные схемы с программируемой логикой, так называемые ПЛИС-компоненты. Отличие ПЛИС от обычных компонентов заключается в заранее неизвестной изменяемой логике, что не позволяет описать интегральную схему в базе данных. Эта особенность выражается в невозможности заранее закрепить за выводом компонента постоянную информацию, так как она программируется в зависимости от конкретной задачи, от конкретного алгоритма функционирования.

Поэтому актуален вопрос разработки моделей, алгоритмов, повышающих эффективность функционирования систем автоматизированного проектирования плоских конструкций.

**Цель диссертационной работы** – повышение эффективности функционирования систем автоматизированного проектирования плоских конструкций электронных модулей, основанных на дискретных электрорадиокомпонентах и ПЛИС-компонентах, за счет разработки моделей и алгоритмов, обеспечивающих нахождение оптимального решения за минимальное время

### **Задачи исследования**

- 1 Анализ моделей, методов и алгоритмов систем автоматизированного проектирования плоских конструкций электронных модулей.
- 2 Разработка моделей и алгоритмов повышения эффективности функционирования систем автоматизированного проектирования плоских конструкций электронных модулей, основанных на дискретных электрорадиокомпонентах и ПЛИС-компонентах.
- 3 Разработка научных основ создания эффективных систем автоматизированного проектирования плоских конструкций электронных модулей.
- 4 Проведение экспериментальных исследований разработанных методов, моделей и алгоритмов, выработка рекомендаций по их практическому применению.

**Объектом исследования** является интегрированный процесс схемотехнического и конструкторского проектирования с применением ПЛИС–компонентов, в создании электронных модулей опытных образцов наземной контрольно-проверочной аппаратуры изделий ракетно-космической техники.

**Предметом исследования** являются модернизированные модели, методы, алгоритмы и инструментальные средства повышения эффективности функционирования систем автоматизированного проектирования плоских конструкций электронных модулей.

**Соответствие специальности.** Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования» по пункту 3 – разработка научных основ построения средств САПР, разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений, включая конструкторские и технологические решения в САПР и АСТПП.

**Методы решения задач.** Исследования и решение поставленных задач проводились с использованием теории характеристического управления, теории множеств, теории графов, теории математического программирования, а также методов, развитых в теории исследования операций, аналитические расчеты проводились с использованием современных средств моделирования и проектирования.

**Научная новизна.** Основные идеи и результаты предлагаемой работы:

- 1 Создание математических моделей, описывающих дискретные электро-радиокомпоненты с жесткой структурой.
- 2 Создание математических моделей компонентов с гибкой структурой в виде ПЛИС.
- 3 Разработка алгоритмов переназначения выводов ПЛИС-компонентов, обеспечивающих 100 % - ю эффективность трассировки соединений за минимальное время.
- 4 Построение программного комплекса планаризации конструкций ЭМ.

**Практическая значимость.** Разработаны модели и алгоритмы, которые позволяют повысить эффективность трассировки соединений автоматизированного проектирования плоских конструкций электронных схем, основанных на дискретных и ПЛИС–компонентах.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается результатами испытаний в процессе опытно-экспериментального производства электронных модулей наземной контрольно-проверочной аппаратуры изделий ракетно-космической техники, разработанных в ОКБ «Спектр», с привлечением результатов исследований и научных положений, разработанных автором, а также разработкой действующих инструментальных средств САПР, подтвержденных актами применения результатов работы на производстве.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Теоретическое и практическое использование результатов диссертации подтверждено актами внедрения в различных организациях технических отраслей (акты приведены в приложении к диссертации):

- филиал АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» - особое конструкторское бюро «Спектр»;
- 1 - й Государственный испытательный космодром Министерства обороны РФ;
- 4 - й Государственный центральный межвидовый полигон Министерства обороны РФ.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- 1 Модели описания дискретных электрорадиокомпонентов и ПЛИС-компонентов, используемые для синтеза плоских конструкций ЭМ.
- 2 Алгоритмы синтеза плоской коммутационной структуры электронного модуля, основанные на планаризации графов теории характеристического управления и обеспечивающих высокую эффективность трассировки.
- 3 Алгоритмы переназначения выводов ПЛИС-компонентов, обеспечивающие эффективность трассировки соединений за минимальное время.
- 4 Инструментальное средство (программный комплекс), повышающий эффективность функционирования автоматизированного проектирования плоских конструкций электронных модулей.

**Апробация результатов.** Основные положения исследования изложены в опубликованных статьях и тезисах докладов. Результаты докладывались и обсуждались на 10-ти научных конференциях международного и всероссийского уровней.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 19 работах автора: 4 статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК, 2 статьи в журналах, входящих в базу Scopus, 1 монография, 11 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях, 1 свидетельство о государственной регистрации программного комплекса (комплекс программ «Справочная система АСУ ПП» 02070163.07566-01). Общий объем опубликованных работ - более 18 печ. л.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка цитированной литературы, приложения. Общий объем работы составляет 158 страниц, библиографический список содержит 123 наименования. В диссертацию включено: 51 рисунок, 6 таблиц, 4 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы и сформулирована основная проблема диссертационной работы, кратко изложены теоретические и практические результаты работы.

**В первой главе** описывается текущее состояние тенденции развития задачи синтеза плоской конструкции ЭМ, которую можно рассматривать как оптимизационную задачу проектирования рисунка печатной платы, которая состоит в построении планарного графа соединений (трассировки) между выводами элементов, размещенных в заданном монтажном пространстве, в соответствии с электрической принципиальной схемой устройства при учете конструктивных ограничений.

**Топологические методы.** Строго говоря, для того, чтобы метод можно было назвать топологическим, он должен совсем не оперировать метрическими понятиями, такими как длина, ширина или расстояние, а может иметь дело только с понятиями лежать между, обход по или против часовой стрелки. В основном, методы базируются на алгоритмах плоских укладок графов и относятся к классу графо-теоретическому. Модель электрорадиоэлемента обычно представляется множеством контактов, между которыми, за счет диаметра монтажного отверстия или конструктива планарной площадки, запрещено или разрешено проведение соединений.

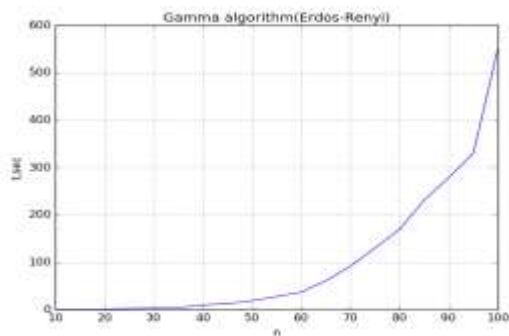
**Бионические алгоритмы.** Ученые не отступают от решения проблемы в виде достижения 100 %-й трассировки соединений на одной стороне печатной платы. Для этого были разработаны алгоритмы планаризации графов на основе ионических технологий; квантовых алгоритмов; генетических алгоритмов; алгоритм Курапова; 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 из-за экспонентальной трудоемкости. Поэтому в настоящее время для этих целей используются принципиально отличающиеся от них стохастические многоагентные алгоритмы бионического класса: 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.

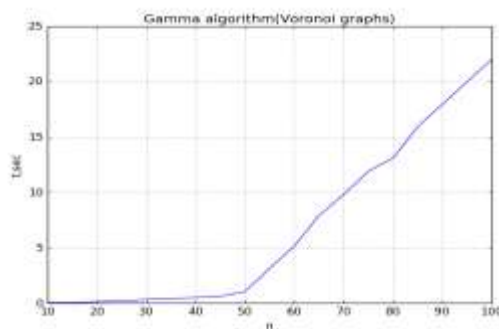
**Алгоритмы построения плоского графа.** Существует ряд других алгоритмов определения плоского графа и укладки планарных графов: алгоритмы, основанные на добавлении пути («path additional algorithm»); алгоритмы, основанные на добавлении вершин («vertex additional algorithm»), алгоритм плоской укладки графов (был предложен Ауслендером и Партером), Хопкрофт и Тарьян смогли улучшить оценку времени работы алгоритма, предложив алгоритм на основе добавления простого пути на каждом шаге, алгоритм на основе добавления на каждом шаге новой вершины (был представлен Лемпелем и Кедрбаумом), Бус и Люкер смогли улучшить подход Лемпеля, предложив приближенный

алгоритм, который работает за линейное время, Гамма-алгоритм, алгоритм укладки графа на плоскости на основе PQ-деревьев, алгоритм для поиска st-нумерации (был предложен в 1976 году Тарьяном Р. и Ивеном Ш.), который работает за линейное время, алгоритм, предложенный Ивеном и Кедербаумом, который за линейное время проверяет граф на планарность, используя такую структуру данных, как PQ-дерево, алгоритм ENTIRE – EMBEDDED (позволяет расширить укладку  $A_u(v)$  графа  $D_u$  в укладку  $A$  исходного графа  $G$ , используя алгоритм за линейное время).

Усредненный график зависимости времени выполнения алгоритмов (№ 1 - 7) от числа вершин приведен на рис. 1,а.



а



б

**Рисунок 1 – График зависимости времени выполнения алгоритмов построения плоского графа от числа вершин:  
а – (№ 1-7); б – (№ 8-12)**

График зависимости времени выполнения алгоритмов № 8-12 от числа вершин приведен на рис. 1, б. Из графиков видна экспоненциальная зависимость трудоемкости выполнения алгоритмов.

**Анализ современных САПР печатных плат.** Современные системы автоматизированного проектирования печатных плат различаются между собой настолько незначительно, что, наблюдая процесс трассировки или ее результат, трудно отличить одну САПР от другой. Такая схожесть систем является следствием схожести применяемых ими алгоритмов, а особенно схожести моделей электрорадиоэлементов и коммутационного пространства печатной платы.

Применяемые современные САПР, позволяют достигнуть эффективности трассировки соединений от 90.8 % до 95.1 %.

**Во второй главе** рассмотрены и предложены модели ЭРЭ для задачи синтеза плоской несущей конструкции электронного модуля печатной платы, которая является одной из самых сложных задач на этапе конструкторского проектирования. 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.

На основе анализа, проведенного в главе 1, для решения данной задачи будем использовать теорию характеристического управления, алгоритмы планаризации графов, а не топографический метод, где приоритет отдается метрическому аспекту задачи.

**Плоская укладка графов.** Метод предполагает предварительный анализ планарности графа схемы с последующей ликвидацией пересечений.

Использование такого подхода и метода синтеза структуры ЭМ на жесткой элементной базе и на базе ПЛИС против традиционного позволяет быстрее и эффективнее создавать изделия. Прежде чем показывать это преимущество, покажем, как можно применить теорию характеристического управления к обычной дискретной элементной базе с жесткой структурой при проектировании однослойных печатных плат.

**Модели жесткой элементной базы.** Основной задачей создания структурной схемы соединений выводов ЭРК является необходимость расположения соединений на плоскости без пересечений, что облегчает условия проведения трасс любому трассировщику современных программ проектирования. Среди критериев планарности графа наиболее известен критерий Понтрягина - Куратовского. Граф планарен тогда и только тогда, когда он не содержит подграфов, гомеоморфных графам  $K_5$  или  $K_{3,3}$ .

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 введем **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  $\Gamma_i$  графа  $G_i$  должен сохранять порядок следования выводов элементов для ЭРЭ с жесткой структурой и может менять порядок следования выводов в случае ПЛИС-технологии (элементы с гибкой структурой);
- в любом плоском представлении схемы чертеж  $\Gamma_i$  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  $G = \cup G_i \cup G_v$ , где  $G_v$  – граф электрических цепей схемы.

Все современные САПР описывают принципиальную схему в виде списка цепей. Поэтому любую цепь  $v \in V$  с размером  $p$  будем представлять в виде дерева типа «звезда» (рис. 2,б).

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

1. Всякая грань плоского чертежа  $\Gamma$  графа  $G$  может быть внешней гранью некоторого плоского чертежа  $\Gamma^*$ . Указанное преобразование достигается путем стереографической проекции, если центр проекции разместить внутри этой грани.
2. Пусть  $\Gamma$  – плоский чертеж графа  $G$  и  $C$  – некоторый цикл. Чертеж  $\Gamma^*$ , полученный переносом всех внутренних относительно  $C$  подграфов во внешнюю область цикла  $C$  и наоборот, также является плоским (рисунок 3).

Пусть  $C$  – внешняя грань, тогда, не нарушая планарности, можно связать вершину  $x_0$  со всеми вершинами цикла  $C$  (рисунок 4,а). 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  $C$  приводят к получению плоского чертежа с внешней гранью  $C$  (рисунок 4, б).

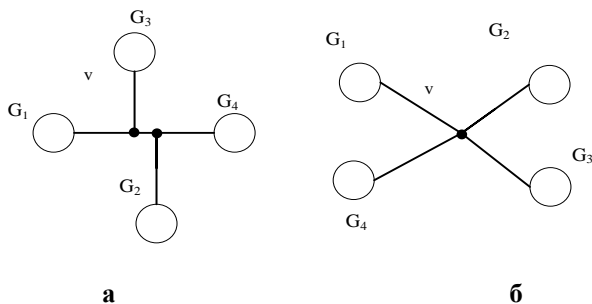


Рисунок 2 – Представление цепи: а – цепь; б – «звезда»

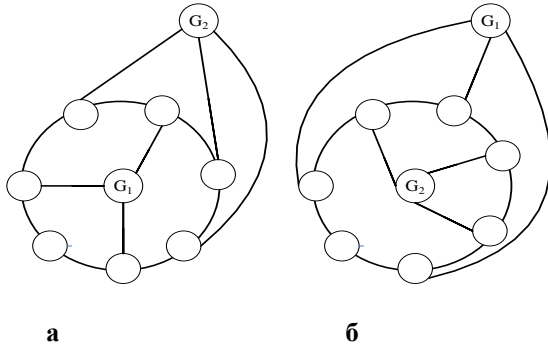


Рисунок 3 – Преобразование чертежа:  
а – чертеж  $G$ ; б – чертеж  $G^*$

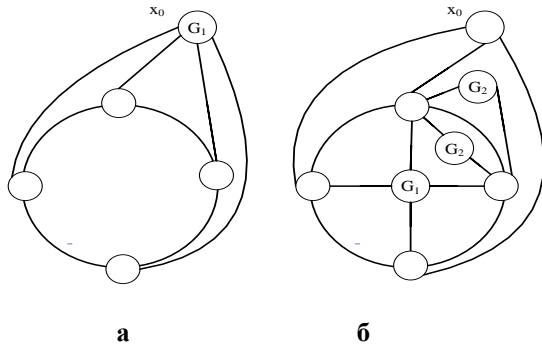


Рисунок 4 – Иллюстрация утверждения 3:  
а – плоский чертеж без нарушения планарности;  
б – плоский чертеж с внешней гранью

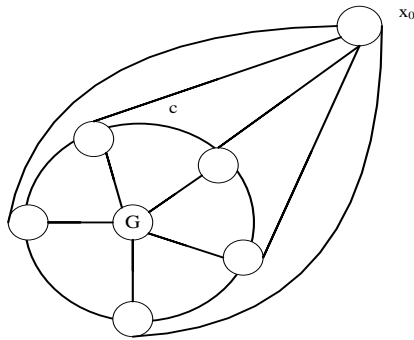


Рисунок 5 – Утверждение 4

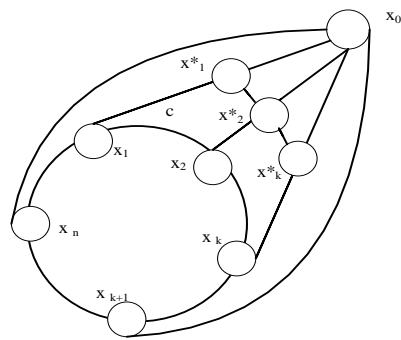


Рисунок 6 – Иллюстрация утверждения 5

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  $\Gamma$ , является то, что граф  $G^*$ , полученный из  $G$  путем добавления вершины  $x_0$  и соединения ее со всеми вершинами из  $X_1$ , должен быть 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  $\Gamma$  в заданном порядке, является то, что граф  $G^* = G \cup \{x_0\} \cup \{u(x_0, x_i), i=1, n\} \cup C(x_1, \dots, x_n)$  должен быть планарен (рисунок 5).

5. Пусть вершины множества  $X_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  должны быть расположены на внешней грани плоского чертежа  $\Gamma$  графа  $G = (X, U)$ , причем некоторые из них должны следовать  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$  в заданном порядке (рисунок 6).

Необходимое и достаточное условие выполнения этого размещения состоит в том, чтобы граф





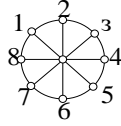
$$G^* = G \cup \{x_0\} \cup \{u(x_0, x_i), i=k+1, n\} \cup \{u(x_i), i=1, k\} \cup \{u(x_0, x^*_i), i=1, k\} \cup \{u(x^*_i, x_i), i=1, k\} \cup \{u(x^*_i, x^*_{i+1}), i=1, k-1\}$$

был бы планарен. Пример реализации условия приведен на рисунке 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" (рис. 7, а) при неупорядоченном наборе выводов и возможности проведения трасс между ними и «колесо» (рис. 7, б), когда задан порядок расположения выводов. Пример частичной упорядоченности выводов представлен моделью на рис. 7, в.



Таблица 1 – Модели элементов схем

№ п/п	Элемент	Обозначение	Модель старая	Модель новая
1	Резистор	1 —  — 2	1°      °2	1° — — — °2
2	Конденсатор	1 —  — 2	1°      °2	1° — — — °2
3	Диод	1 —  — 2	1°      °2	1° — — — °2
4	Транзистор	с  3 и	с      3 °      ° и	
5	Микросхема с запретом прокладки трасс между выводами	 1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 ° ° ° ° ° ° ° ° 5 6 7 8	

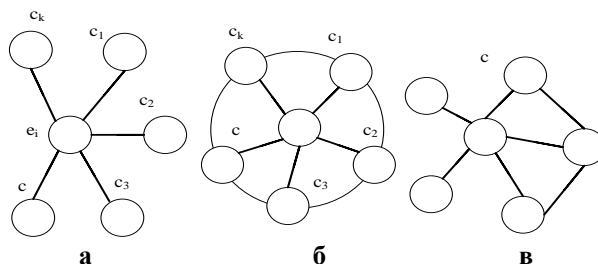


Рисунок 7 – Модели элементов: а – «звезда»; б – «колесо»; в - «с частичной упорядоченностью выводов»

В таблице 1 представлены некоторые **новые модели элементов** схемы, которые приведены для описания принципиальных схем.

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

Рассмотрим пример схемы (рис. 8), состоящей из двух микросхем (операционные усилители)  $D1, D2$ , 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.

Для исследования планарности графа  $G$  можно предварительно провести следующие упрощения: ликвидировать висячие вершины и инцидентные им ребра; ликвидировать вершины степени 2, заменив два ребра одним (рис.9, а); заменить все кратные ребра одним ребром.

Проведенные упрощения не изменяют планарности исходного графа  $G$ . В результате получим (рис.9, б) граф для схемы рис. 8.

Согласно критерию Понтрягина, этот граф является не планарным, поскольку содержит подграфы (рис. 10 а, б, в, г), гомеоморфные графу  $K_{3,3}$ , и подграфы, гомеоморфные графу  $K_5$  (рис. 11 а, б, в, г).

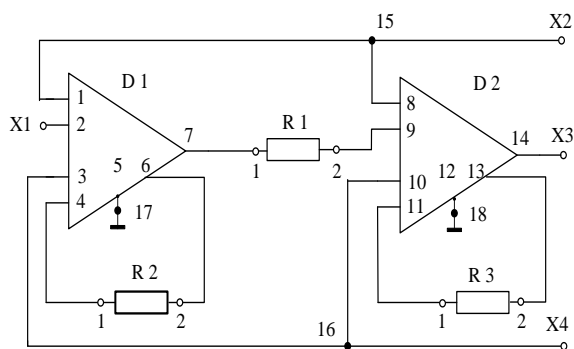


Рисунок 8 – Фрагмент схемы

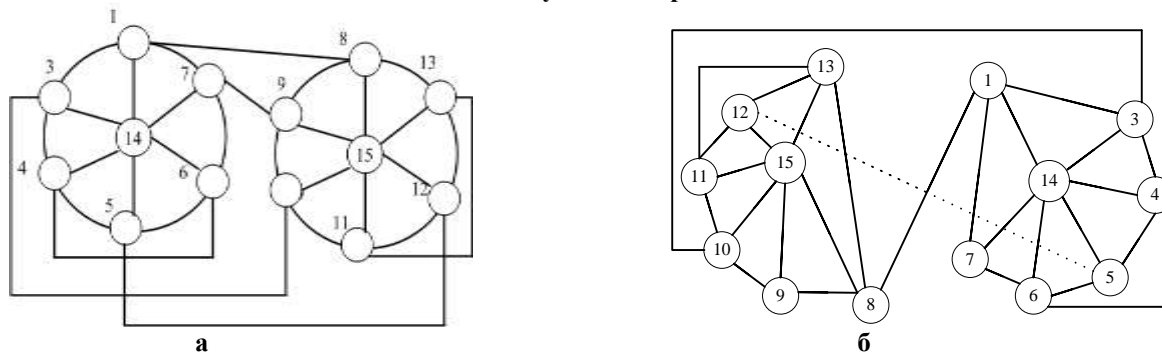


Рисунок 9 – Граф-схемы: а – частный вид; б – общий вид

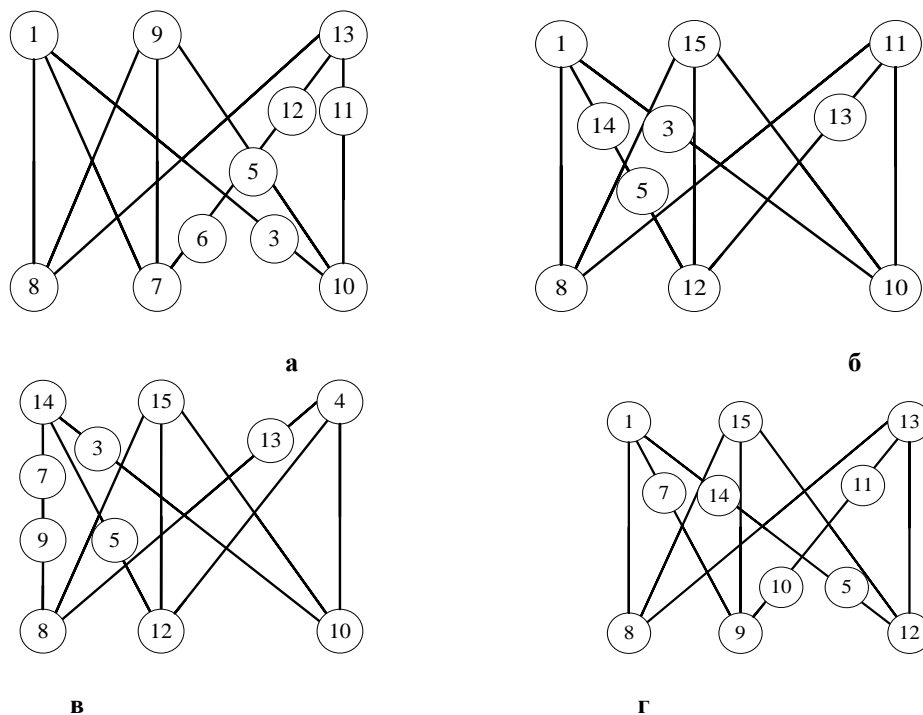
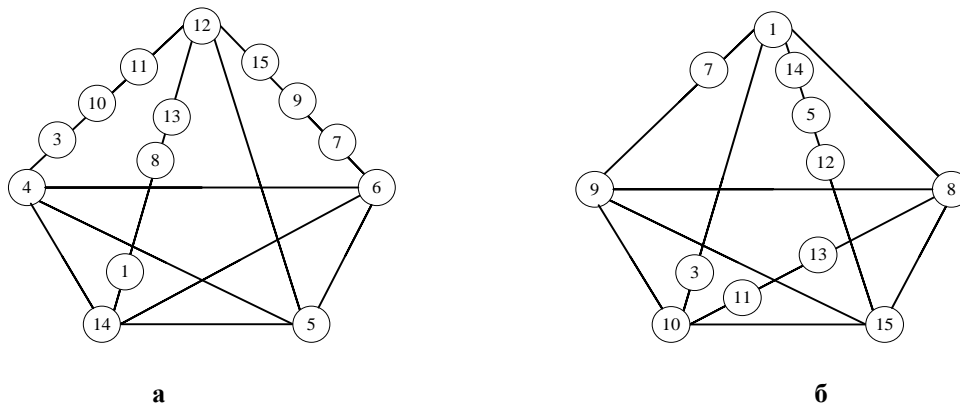


Рисунок 10 – Подграфы, гомеоморфные графу К 3,3



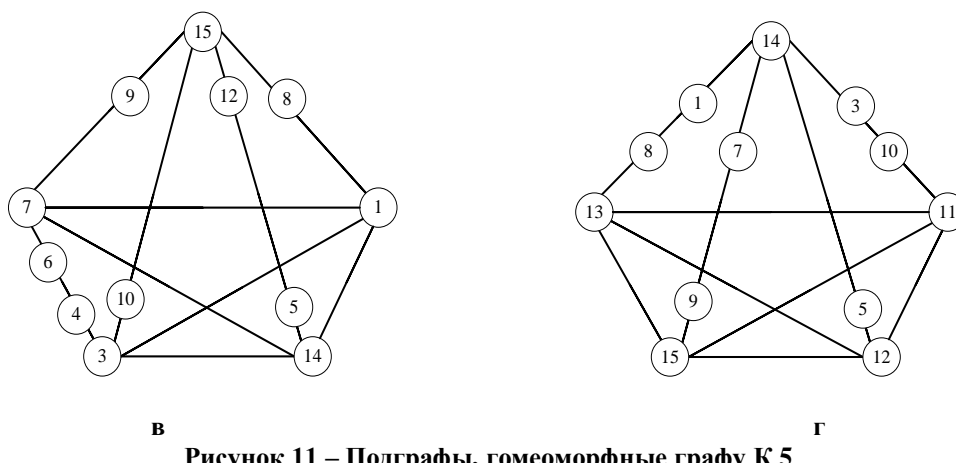


Рисунок 11 – Подграфы, гомеоморфные графу  $K_5$

Используя теорию характеристического управления, предложенную В.А.Горбатовым, можно определить, какие ребра необходимо удалить для преобразования исходного графа схемы в планарный. Для этого выделим все запрещенные фигуры (графы  $K_{3,3}$  и  $K_5$ ) и построим двумерную матрицу, каждая строка которой взаимно однозначно соответствует запрещенной фигуре  $Q_i$  (подграфу  $K_{3,3}$  и  $K_5$ ), 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 ( $K_{3,3}$ ;  $K_5$ ) из класса подграфов, гомеоморфных  $K_{3,3}$  или  $K_5$ , т.е. из класса запрещенных в класс разрешенных.

Матрица для рассматриваемого графа имеет следующий вид (таблица 2).

Таблица 2 – Таблица преобразования исходного графа схемы

Запрещенные фигуры	$P_i$					
	$\{1,8\}$	$\{7,9\}$	$\{5,12\}$	$\{11,13\}$	$\{4,6\}$	$\{3,10\}$
$Q_i$	$\{1,8\}$	$\{7,9\}$	$\{5,12\}$	$\{11,13\}$	$\{4,6\}$	$\{3,10\}$
$K_{3,3}^1$	1	1	1	1		1
$K_{3,3}^2$	1		1	1		1
$K_{3,3}^3$	1	1	1	1		1
$K_{3,3}^4$	1	1	1	1		
$K_5^1$	1	1	1		1	1
$K_5^2$	1	1	1	1		1
$K_5^3$	1	1	1		1	1
$K_5^4$	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 рис. 11,б. Соединение, которое соответствует удаленному ребру (показано пунктирной линией), реализуется с помощью технологической перемычки или переносится на вторую плоскость. Толщина графа  $G$  равна 2.

**Модели элементной базы с «гибкой» структурой.** Рассмотрим элементную базу, когда отсутствует закрепление выводов. Граф схемы с незакрепленными выводами элементов будет иметь вид рис. 12.

Проведя аналогично вышеуказанным упрощения: ликвидировать вершины степени 2, заменяя два ребра одним; заменить кратные ребра одним ребром, получим граф, который планарен (рис. 13). По критерию Понтрягина - Куратовского граф не содержит подграфов, гомеоморфных графу  $K_{3,3}$  или  $K_5$ , поэтому исходный граф с незакрепленными выводами будет планарен.

Рассмотрим ПЛИС-технологии. ПЛИС-технология подразумевает, что корпус микросхемы имеет упорядоченный порядок выводов, но, как уже отмечалось ранее, программирование выводов можно осуществить после построения трассировки соединений.

Другими словами, алгоритм проектирования конструкции РЭС по ПЛИС-технологии может иметь следующий вид:

1. Размещение корпусов ЭРЭ по одному из критериев качества.
2. Соединение выводов корпусов и построение граф-схемы.
3. Анализ планарности графа. Если граф планарен, то переход к п.5. Иначе к следующему пункту.
4. Планаризация графа. Переназначение выводов корпусов с целью построения планарного графа или графа с минимальной толщиной.
5. Построение принципиальной схемы.
6. Программирование ПЛИС.

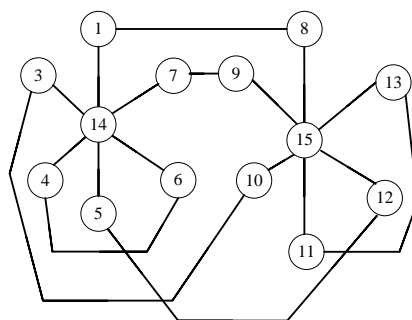


Рисунок 12 – Граф схемы с незакрепленными выводами

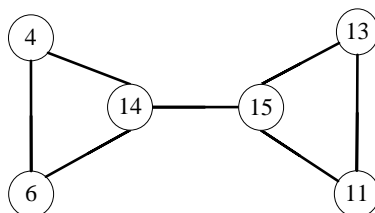


Рисунок 13 – Планарный граф для схемы с незакрепленными выводами

В этом алгоритме наибольший интерес вызывает задача переназначения выводов с целью построения планарного графа. Современные корпуса ПЛИС имеют в своем составе до 200-300 выводов. Наличие такого количества выводов для решения задачи переназначения выводов несет в себе комбинаторный взрыв трудоемкости поиска оптимального значения. Поэтому актуален вопрос построения алгоритма, сокращающего время решения этой задачи.

Характеризационный алгоритм решения задачи состоит из процедуры семантического эквивалентирования и фактического получения решения. Первая процедура состоит в преобразовании исходной информации к виду, при котором, фактически не строя решения, можно вычислить функционал его качества. Трудоемкость характеризационных алгоритмов для практических задач оценивается полиномиальной функцией, степень которой не превышает 5 ( $n^5$ ).

Автором предлагается алгоритм формирования соединений между выводами ЭРЭ с целью создания планарного графа схемы, который основан на алгоритме Бадера - Фишера. Здесь на каждом шаге процесса формирования соединения строится планарный псевдогамильтонов граф и на его основе плоский чертеж. Таким образом, выполняя последовательно чертежи соединений между выводами ЭРЭ, получаем по окончании процесса синтеза структуры плоский чертеж графа схемы. Если в результате синтеза все же получается не планарный граф, то алгоритм производит последовательное удаление не планарных ребер или переназначение порядка выводов, в результате которого отыскивается

максимальный планарный граф. Другими словами, предлагается алгоритм, позволяющий построить плоский чертеж граф-схемы без удаления не планарных ребер.

**В третьей главе** разработаны новые алгоритмы синтеза плоских структур, обеспечивающие построение плоского графа без удаления не планарных ребер.

Появление перспективной конструкции печатных плат плоского типа, предъявляющей жесткие требования к созданию структуры изделия планарного свойства, ещё более усугубляет проблему синтеза устройств подобного класса и подтверждает актуальность задачи создания методов синтеза данных структур.

Пусть  $C$  – некоторый цикл связного графа  $G$ . Этот цикл описывает модель выводов ЭРЭ. Относительно цикла  $C$  все ребра  $U$  графа  $G = (X, U) \setminus C$  разбиваются на два непересекающихся подмножества (рис. 14):  $U_1$  – внешние ребра, соединяющие вершины, не лежащие на цикле;  $U_2$  – ребра, соединяющие одну из вершин цикла с вершиной, не принадлежащей циклу.

После замены каждого подграфа  $G_i$  ( $i = 1, k$ ), состоящего из внешних ребер, одной вершиной  $v_i$ , получим псевдогамильтоновый граф  $G^*$  (рис. 15).

Пусть  $U_2(G_i)$  – ребра, соединяющие подграф  $G_i$  с циклом  $C$ . Назовем компонентой разложения граф (рис. 16)  $G_i^{**} = G_i \cup U_2(G_i) \cup C$ ,  $i = 1, k$ .

На основе анализа, проведенного в главе 1, для решения данной задачи предполагается предварительный анализ планарности графа схемы с последующей ликвидацией пересечений.

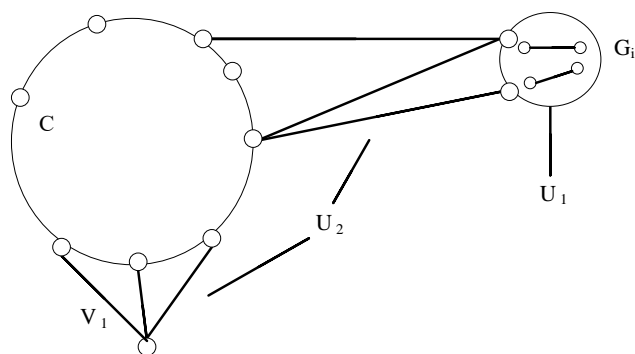
Использование такого подхода и метода синтеза структуры РЭС на базе ПЛИС против традиционного позволяет быстрее и эффективнее создавать изделия.

Таким образом, процесс создания планарного графа  $G$  сводится к последовательному наращиванию планарных псевдогамильтоновых графов  $G^*$ .

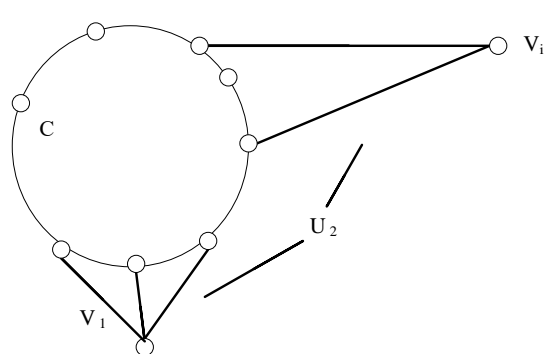
Планарность тех или иных графов (псевдогамильтоновых и др.) анализируется на основании наличия или отсутствия запрещенных фигур, подграфов, гомеоморфных графам Понтрягина - Куратовского  $K_5$  и  $K_{3,3}$ .

Назовем мостом любую вершину  $v_i$  с инцидентными ей ребрами ( $u \in U_2$ ) (рис. 15). Пусть имеется множество мостов  $M$ . Мосты  $A \in M$  и  $B \in M$  называются конфликтующими ( $A \perp B$ ), если на любом чертеже графа  $G^*$  они не могут быть расположены без пересечений по одну сторону цикла  $C$ , и неконфликтующими в противном случае (рис. 17).

Представим себе граф конфликтов для псевдогамильтонова графа  $G^*$  в виде  $Z = (M, \Phi)$ , вершины которого соответствуют мостам  $G^*$ , а ребра  $f \in \Phi$  – наличию конфликта между мостами. Поскольку планарность  $G^*$  определяется возможностью расположения мостов по обе стороны от цикла  $C$  без пересечений, то это соответствует раскраске графа  $Z$  в два цвета. Согласно теореме Кенига, такая раскраска (в два цвета) возможна, если граф не содержит циклов нечетной длины. В нашем случае конфликтный граф содержит изолированные вершины (мосты  $A$  и  $B$  не конфликтующие), что позволяет их сделать соцветными и расположить по одну сторону от цикла.



**Рисунок 14 – Разбиение ребер графа  $G$ :**  
 $U_1$  – внешние ребра;  
 $U_2$  – ребра присоединения



**Рисунок 15 – Разложение графа  $G$  относительно цикла  $C$**

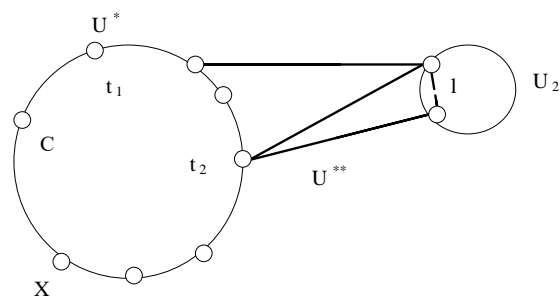
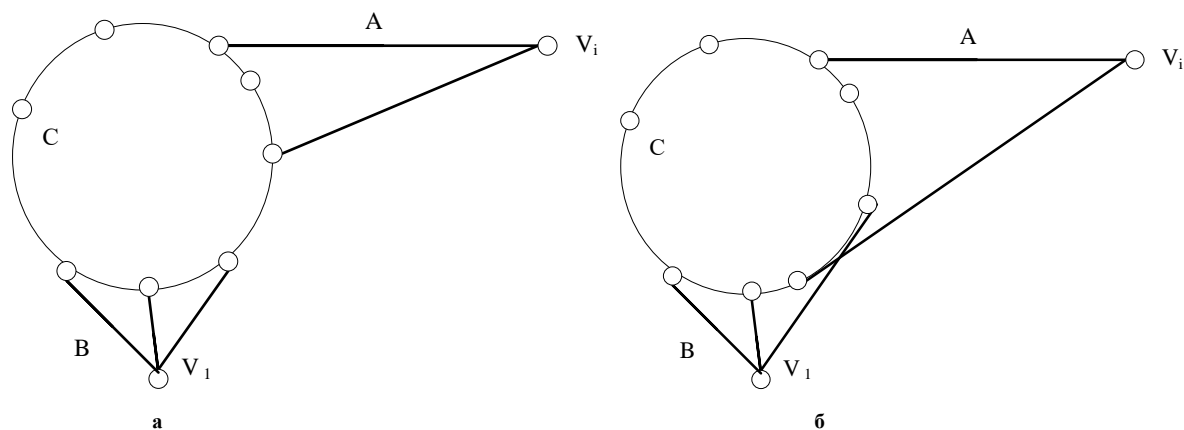
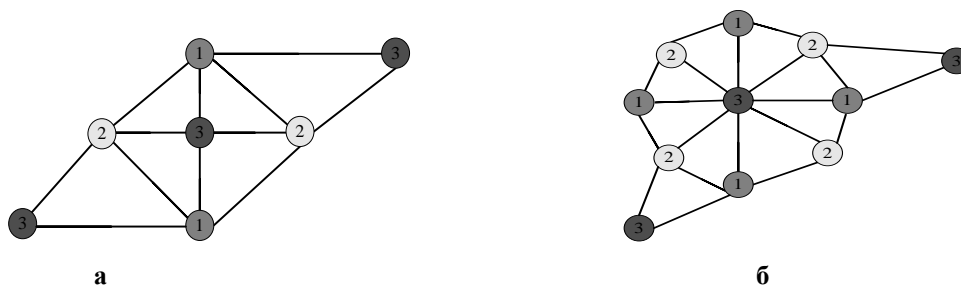


Рисунок 16 – Компонента разложения

Рисунок 17 – Иллюстрация мостов А и В:  
а – не конфликтующие мосты; б - конфликтующие мостыРисунок 18 – Пример иллюстрации с запрещением размещения мостов при различных конструкциях:  
(1, 2, 3 – номер цвета)

На рис. 18 приведен граф  $G^*$  с запрещением размещения мостов по другую сторону от цикла  $C$  (невозможность проведения проводников, модель типа «колесо») при различных его моделях (конструкциях). Как видно из рисунка, мосты имеют одинаковый цвет и не конфликтуют. Более того, эти графы планарны, так как не содержат подграфов, гомеоморфных графам  $K_5$  и  $K_{3,3}$ .

Можно дать другое утверждение. Если любые два моста графа  $G$ , расположенные по одну сторону от цикла  $C$ , являются не конфликтующими, то граф планарен.

Следует, что мосты  $A$  и  $B$  графа  $G$  конфликтуют тогда и только тогда, когда один из мостов содержит не планарное ребро, т.е. то ребро, которое переводит запрещенную фигуру  $K_5$  и  $K_{3,3}$  в класс разрешенных.

Действительно, рассмотрим граф  $G^*$ , приведенный на рис. 19, а. Мост 6 (ребро 3,6) конфликтует с мостом 7 (ребро 2,7), поскольку граф  $G^*$  не планарен, т.к. содержит подграф гомеоморфный  $K_5$  (рис. 19, б). На основании характеристического анализа определяем ребра, которые переводят запрещенную фигуру  $K_5$  или  $K_{3,3}$  (в нашем случае  $K_5$ ) в класс

разрешенных. Это ребра  $\{1,6\}$ ,  $\{3,6\}$ ,  $\{2,7\}$ ,  $\{4,7\}$ , которые входят в состав конфликтующих мостов. Конфликтуют ребра  $\{3,6\}$  и  $\{2,7\}$ , что и требовалось доказать.

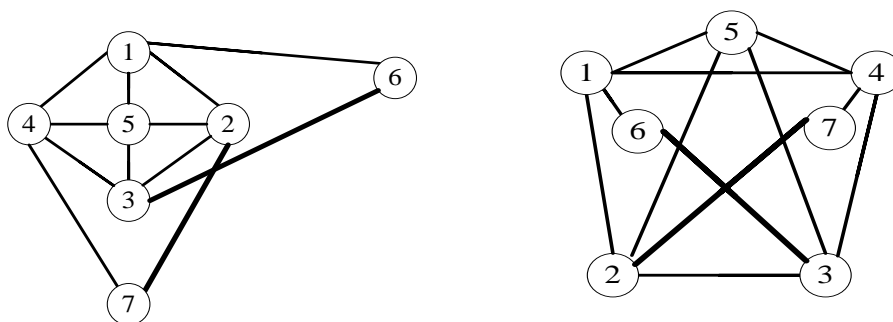


Рисунок 19 – Иллюстрация графа: а – граф  $G^*$  с конфликтующими мостами 6 и 7; б – подграф, гомеоморфный  $G_5$

Действительно, рассмотрим граф  $G^*$ , приведенный на рис. 19, а. Мост 6 (ребро 3,6) конфликтует с мостом 7 (ребро 2,7), поскольку граф  $G^*$  не планарен, т.к. содержит подграф гомеоморфный  $K_5$  (рис. 19, б). На основании характеристического анализа определяем ребра, которые переводят запрещенную фигуру  $K_5$  или  $K_{3,3}$  (в нашем случае  $K_5$ ) в класс разрешенных. Это ребра  $\{1,6\}$ ,  $\{3,6\}$ ,  $\{2,7\}$ ,  $\{4,7\}$ , которые входят в состав конфликтующих мостов. Конфликтуют ребра  $\{3,6\}$  и  $\{2,7\}$ , что и требовалось доказать.

Все эти рассуждения необходимы для того, чтобы привести процесс создания графа соединений между выводами ПЛИС-корпусов к планарному виду. Например, в тех случаях, когда может возникнуть ситуация с конфликтующими мостами. Как от неё избавиться и выполнить планаризацию графа соединений без удаления не планарных ребер? Используем алгоритм, который позволяет два конфликтующих моста (граф не планарен) перевести в разряд не конфликтующих (граф планарен) без удаления не планарных ребер.

*Алгоритм.* Обратимся к графу  $Z$ . Пусть  $X_0$  и  $X_1$  - подмножества вершин, окрашенных различными цветами. Алгоритм имеет следующий вид:

1. Используя теорию характеристического управления, определить не планарные ребра  $u_k(v_i, x_j) \in M$ , где  $k \in K$ ,  $v_i$  – вершина вне цикла  $C$ ;  $x_j$  – вершина, принадлежащая циклу  $C$  в графе  $G^*$ .
2. Заполнить граф конфликтов  $Z$ .
3. Граф  $Z$  соцветен? Если да, то конец алгоритма. Иначе, переход к п.4, если граф не планарен. Если граф планарен, то конец алгоритма, или если есть смысл улучшения топологии, то переход к п.1.
4. Отнесем к этим подмножествам  $X_0$  и  $X_1$  все вершины графа  $Z$ , т.е. соответствующие мосты с неустранимым конфликтом.
5. Выбрать вершину  $m_p \in M$  из графа  $Z$ , т.е. одно из не планарных ребер  $u_p(v_i, x_j)$ ,  $p \in K$ .
6. Выбрать смежную вершину  $m_s \in M$  из графа  $Z$ , которой соответствует ребро  $u_s(v_1, x_1)$ .
7. Вершину  $x_i$  заменить на  $x_j$ .
8. Перевести вершины  $m_p$  и  $m_s$  в соцветные, если они не смежные. Переход к п. 3.

Рассмотрим пример перевода не планарного графа в планарный путем назначения порядка следования выводов ПЛИС-корпусов на основании приведенного алгоритма.

Пусть исходная схема соединений после решения задачи размещения имеет вид (рис. 20а).

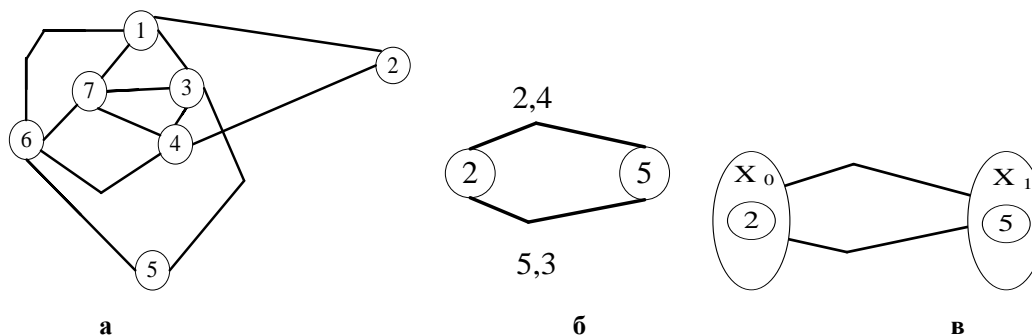


Рисунок 20 – Исходная схема соединений: а – исходная схема; б – граф конфликтов; в – мосты с неустранимыми конфликтами (раскраска графа)  
После выполнения алгоритма имеем следующий граф схемы (рис. 21).

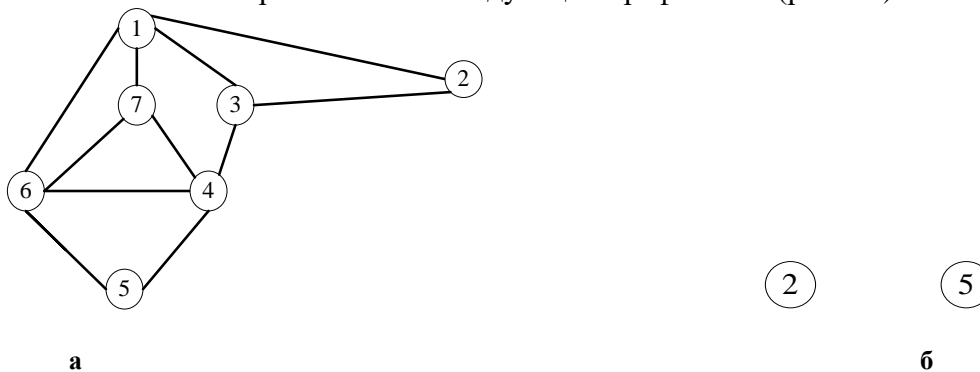


Рисунок 21 – Пример реализация алгоритма: а – результирующий (планарный граф); б – граф конфликтов

Рассмотрим более сложный пример. Пусть исходная схема соединений после решения задачи размещения имеет вид (рис. 22, а).

Последовательность решения задачи планаризации графа по вышеприведенному алгоритму имеет вид, представленный на рис. 22 ,б, в.

После выполнения имеем следующий граф схемы (рис. 23, а). А граф конфликтов  $z$  представлен на рис. 23, б.

Планаризация исходного графа схемы выполнена. Но при таком размещении ЭРЭ схемы на поле печатного узла остается граф конфликтов, увеличивающий длину соединений при трассировке цепей мостов 8 и 9.

Выход из этого положения может быть в решении задачи размещения с целью устранения конфликтующих мостов. Для решения этой задачи используются топологические методы, которые, как показывает опыт, обладают высокой трудоемкостью, что, в общем, неприемлемо при проектировании схем большой размерности.

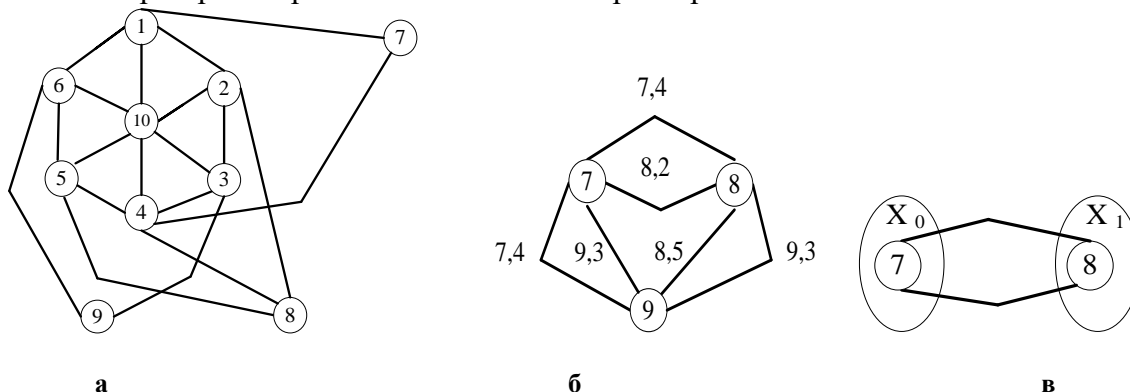
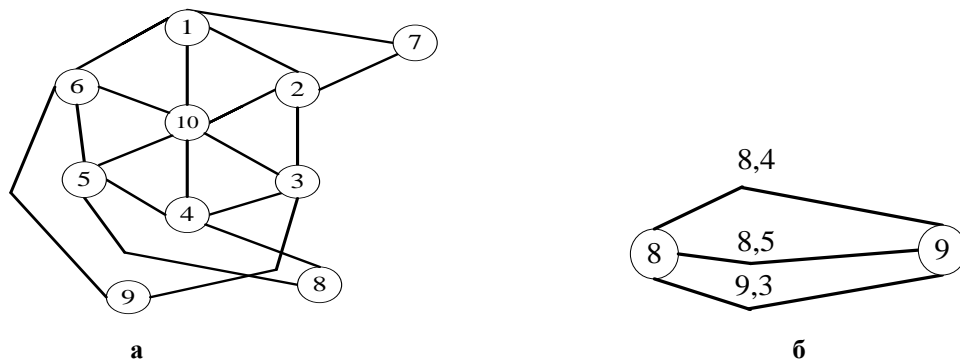


Рисунок 22 – Пример реализация алгоритма: а – исходная схема соединений; б – граф конфликтов; в – произвольные мосты с неустранимыми конфликтами (раскраска графа)

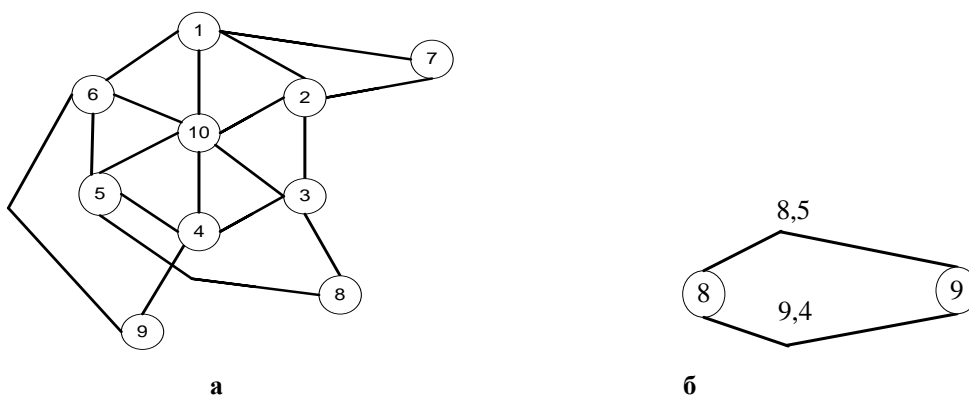
В настоящей работе используется, как уже отмечалось, не топологический, а графотеоретический подход для решения задачи планаризации графа с минимизацией длины соединений при трассировке цепей.



Для этого продолжим алгоритм, поскольку имеет место граф конфликтов Z.



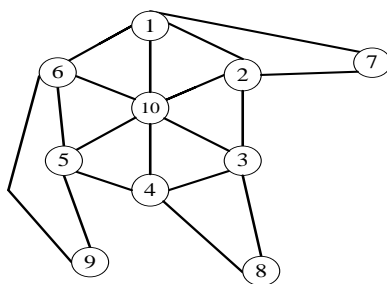
**Рисунок 23 – Пример реализация алгоритма: а – граф после алгоритма; б – граф конфликтов**  
После выполнения имеем следующий граф схемы (рис. 24, а) и граф конфликтов (рис. 24,б). Этот граф уже не планарный.



**Рисунок 24 – Пример реализация алгоритма: а – граф после алгоритма; б – граф конфликтов**

Решение задачи в данной постановке мы уже рассматривали в предыдущем примере. Окончательное представление граф-схемы будет иметь вид (рис. 25).

Возможности предлагаемого алгоритма по планаризации граф-схемы, использующей в своем составе ПЛИС-технологии, приведены в практической части настоящей работы.



**Рисунок 25 – Представление граф-схемы после реализация алгоритма планаризации**

**В четвертой главе** диссертационной работы представлено разработанное инструментальное средство, которое является теоретическим базисом для создания программного приложения к известным САПР, таким как P-CAD, DipTrace и другие (всего 34 системы), расширяя возможности и повышая эффективность функционирования современных систем автоматизированного проектирования плоских структур ЭМ. Приводится описание структуры и функционирования программного приложения к системам автоматизированного проектирования плоских структур электронных модулей. Для повышения эффективности функционирования современных САПР плоских конструкций ЭМ, как было отмечено в главе 1, наиболее продуктивным вариантом является реализация разработанных моделей и алгоритмов в виде программного приложения. При его

реализации (рис. 26) данные в формате Gerber, сформированные в САПР, например P-CAD (Altium Designer), поступают на вход созданного программного приложения.

Далее, планарный граф преобразуется в Gerber формат и поступает в базу данных для последующего использования одной из САПР.

На основании вышеизложенного и анализа опыта проектирования систем автоматизированного проектирования ЭМ различного практического применения и их составных частей разработана структура и определен порядок функционирования математического обеспечения в виде программного приложения для различных систем автоматизированного проектирования.

**Структура программного приложения.** Основными функциональными компонентами являются база исходных данных, модуль планаризации графа с дискретными (с жесткой структурой) элементами и с «гибкой структурой» в виде ПЛИС-компонентов. Библиотека содержит информацию о каждом электрорадиокомпоненте как совокупности графов связей и контактов.

Предложенная структура хранения исходных данных в разработанном приложении позволяет системам автоматизированного проектирования плоских структур содержать и накапливать информацию, достаточную для автоматизированного проведения процедуры планаризации схемы принципиальной в виде графа. Взаимодействие оператора с приложением определяется организационным и методическим обеспечением и осуществляется с помощью пользовательского интерфейса.

**Результаты синтеза плоской структуры электронных модулей.** Основным критерием эффективности построения плоских структур является 100 % -я трассировка соединений между элементами структуры в одном слое. Для проведения эксперимента по трассировке соединений использовался современный пакет прикладных программ Altium Designer (P-CAD), DipTrace.

Более подробно этот материал представлен в работах автора и защищен авторским правом на программный продукт.

Проведены также эксперименты при проектировании плоских конструкций ЭМ, основанных на гибкой элементной базе с применением ПЛИС (Altera) элементов. Результаты экспериментов с применением дискретных элементов и ПЛИС элементов приведены в таблице 3 и 4.

Здесь основным показателем эффективности функционирования систем автоматизированного проектирования печатных плат является процент не разведенных трасс.

Представлены табл. 3, 4 и рис. 27 зависимости трассировки (в процентах) в обычном режиме и после проведения планаризации относительно нормо-часов (трудоемкость) при выполнении работ, связанных с размещением, трассировкой и последующей доработкой. Количество связей на момент проведения исследований – 508 и 296 шт.

На рис. 28, а представлен электронный модуль с ПЛИС-микросхемой (Altera) до проведения процедуры планаризации, а на рис. 28, б – после планаризации (выделенные области). Как видно, эффективность полученного эксперимента составляет 7-9 %.

Итак, использование разработанных моделей ЭРК и алгоритмов планаризации графов для проектирования плоских структур электронных модулей позволяет повысить относительную эффективность трассировки соединений в среднем на 2 - 10%. Абсолютная эффективность составляет 20-50 %. Также стоит отметить, что при использовании предложенного подхода сокращается длительность процесса проектирования (2 - 10 %), что приводит к повышению эффективности разработки ЭМ.

Как видно из экспериментальных результатов, планаризация графа схемы ЭМ позволяет облегчить условия трассировки современным пакетам программ, повысить до 100 % эффективность функционирования САПР.

Более подробно этот материал представлен в работах автора и защищен авторским правом на программный продукт.

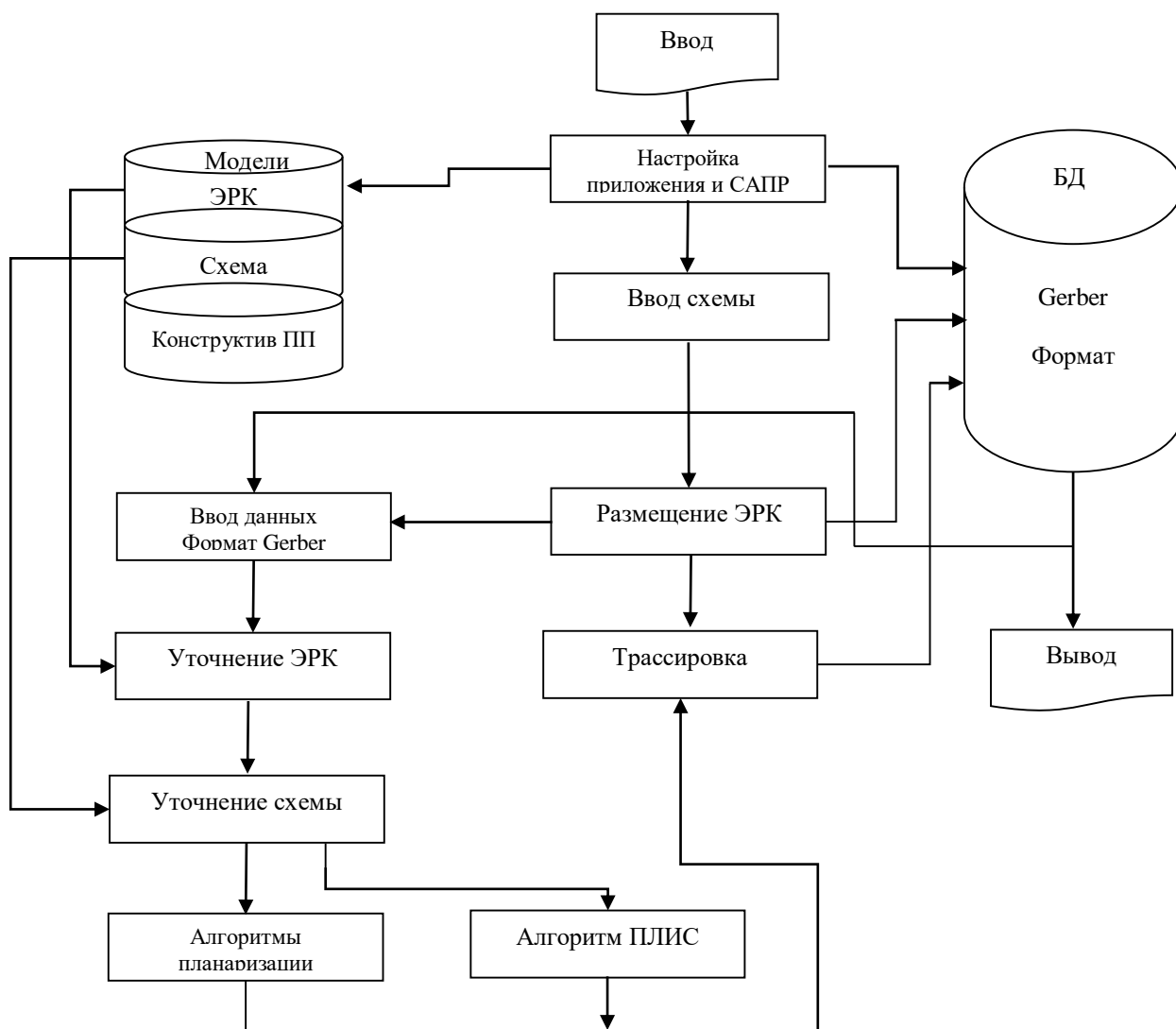


Рисунок 26 – Структура программного приложения

Таблица 3 – Результаты проектирования ЭМ до планаризации

Наименование	Дискретные ЭРЭ	Схема на ПЛИС	Примечание
Количество связей в исходной схеме	508	296	
DipTrace количество не разведенных до планаризации	30	27	
% не разведенных	5.75	9.12	
P-CAD (Altium Designer) количество не разведенных до планаризации	25	21	
% не разведенных	4.96	7	

Таблица 4 – Результаты проектирования ЭМ после планаризации

Наименование	Дискретные ЭРЭ	Схема на ПЛИС	Примечание
Количество связей в исходной схеме	508	296	
DipTrace количество не разведенных после планаризации	4	0	
% не разведенных	0.79	0	
P-CAD (Altium Designer) количество не разведенных после планаризации	5	0	
% не разведенных	0.98	0	

**В заключении** представлены основные результаты исследований, полученные научные и практические достижения, приводятся сведения о внедрении, а также предложения по дальнейшему использованию результатов работы.

В приложении приведены акты внедрения.

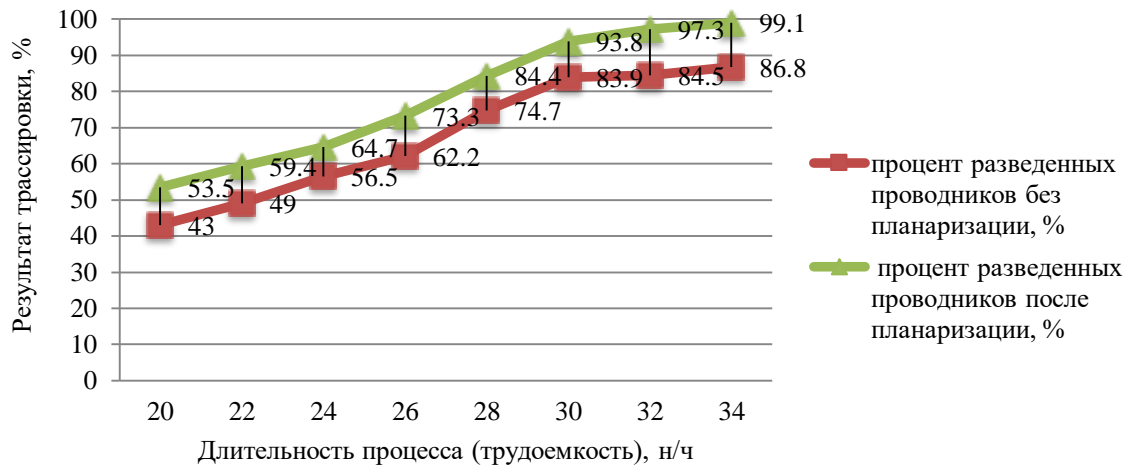


Рисунок 27 – График зависимости трассировки (в процентах) в обычном режиме и после проведения планаризации относительно длительности процесса

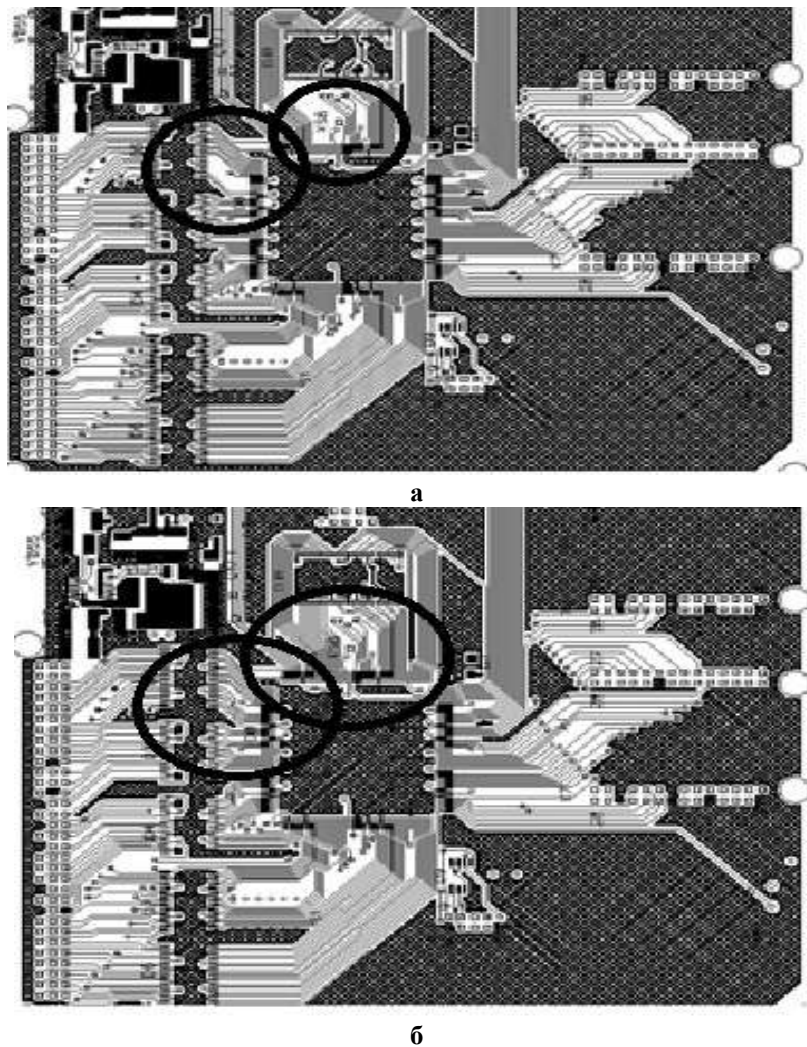


Рисунок 28 – Печатная плата электронного модуля: а - до планаризации; б - после планаризации

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы известные модели и алгоритмы плоской укладки графов, обладающие экспоненциальной зависимостью трудоемкости решения, выявлен недостаток САПР плоских конструкций ЭМ, которым является заложенный в них топологический подход, основанный

на принципе последовательного и фрагментарного просмотра коммутационного пространства.

2. Разработаны новые графовые модели описания электрорадиокомпонентов с «жесткой» и «гибкой» структурой для повышения эффективности проектирования плоских конструкций ЭМ. Относительная эффективность трассировки соединений выросла в среднем на 2 – 10 %, абсолютная эффективность составила 20-50 %.

3. Разработаны алгоритмы синтеза плоских структур ЭМ с элементной базой в виде жесткой и гибкой структуры, проведено исследование целесообразности ввода новых моделей электрорадио-компонентов для синтеза плоской структуры ЭМ на примере построения односторонних, двухсторонних печатных плат.

4. Разработан алгоритм переназначения выводов ПЛИС-компонентов, обеспечивающий 100 %-й критерий создания планарного графа для решения задачи синтеза плоской конструкции ЭМ.

5. На базе разработанных моделей и алгоритмов предложена структура и определен порядок функционирования инструментального средства (программного приложения) к системам автоматизированного проектирования плоских конструкций ЭМ.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. **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. №2 (выпуск 56). С. 83– 89.

2. **Потапов В. И., Сускин В. В.** Модели и алгоритмы проектирования плоских структур электронных средств на основе гибкой элементной базы // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. №4 (выпуск 62). С. 79-88.

3. **Потапов В.И.** Запрещенные фигуры в задаче раскраски графа // Наука и бизнес: пути развития. 2020, №11, (выпуск 113). С. 123-127.

4. **Потапов В.И.** Применение запрещенных фигур в задаче раскраски графа при проектировании печатных плат // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. №12. С.

### Статьи, индексируемые в базах Scopus и Web of Science

5. **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.

6. **S. V. Spitsyn, V. I. Potapov, V. P. Koryachko.** The algorithm of processing and presenting the digital trajectory data obtained when launching rocket vehicle // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE ), 2020.

### Монография

7. **Потапов В. И., Сускин В. В., Шевченко В. Ф.** Теория характеристического управления в конструировании плоских структур радиоэлектронных средств. Рязань: ООО «Экотекст», 2017. 92 с.

### Зарегистрированные программы для ЭВМ

8. **Федин Н.В., Эрзин А.В. Потапов В.И.** Комплекс программ «Справочная система АСУ ПП» 02070163.07566-01.

### Тезисы докладов конференций

9. **Потапов В.И., Сускин В.В.** Синтез плоских структур электронных средств, построенных с применением теории характеристического управления //Перспективы развития информационных технологий: сборник материалов XXXV Международной научно-практической конференции. Новосибирск, 2017. № 35. С. 34-45

10. **Потапов В.И.** Разработка АСУ ТП в радиоэлектронике с элементами искусственного интеллекта // Сб. тез. докл. международной конференции «CAD/CAM/PDM-2002», М.: ИПУ РАН, 2002.

11. **Потапов В. И.** Задача синтеза плоских структур электронных средств на гибкой элементной базе с применением теории характеристизационного управления // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (V Козловские чтения). Самара, 2017. СамНИЦ РАН. Т 2. С.181-194.

12. **Потапов В.И.** Задача синтеза плоских структур радиоэлектронных средств с применением семантического подхода теории характеристизационного управления // 7-я Международная научно-техническая конференция «К.Э.Циолковский – 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: тез. докл./ Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2017. С. 258-263.

13. **Потапов В.И., Сускин В.В., Капранов А.П.** О применении графо-теоретического метода к анализу качества функционирования радиоэлектронных средств // XXXI Международная научная конференция «Техноконгресс». Кемерово, 2018. В системе НЭБ elibrary.ru.

14. **Потапов В.И., Сускин В.В., Филаткин С.В.** Принцип построения плоских конструкций электронных схем с учетом запрещенных фигур // Современные направления и перспективы развития технологий и оборудования в машиностроении 2020 (ICMTME 2020).

15. **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.

16. **Spitsyn S.V., Potapov V.I., Koryachko V.P.** The algorithm of processing and presenting the digital trajectory data obtained when launching rocket vehicles // III Международная конференция “MIST: Aerospace III - 2020”: Передовые технологии в аэрокосмической отрасли, машиностроении и автоматизации. Красноярский дом науки и техники. Красноярск, 2020.

17. **Потапов В.И.** Задача синтеза структуры электронных модулей, построенных с использованием принципов характеристизационного управления // Сборник 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.** Алгоритм проектирования электронных модулей контрольно-проверочной аппаратуры с жесткой логикой функционирования, построенных с применением теории характеристизационного управления // 10-я Международная научно-практическая конференция «Перспективное развитие науки, техники и технологий». Юго-Западный государственный университет. Курск, 2020. С. 33-44.

19. **Потапов В.И.** Запрещенные фигуры в проектировании контрольно-проверочной аппаратуры // Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции "САПР и моделирование в современной электронике-2020". Брянск: БГТУ 2020. С. 41-44.

**Потапов Вадим Игоревич**

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ НАЗЕМНОЙ КОНТРОЛЬНО - ПРОВЕРОЧНОЙ  
АППАРАТУРЫ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО - КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_\_\_ \_\_\_\_\_ 2021. Формат бумаги 60x 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,25.

Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в филиале ОКБ «Спектр»

Адрес: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д.59,а.