

УДК 681.3

ПАКЕТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СТРУКТУР

В.А.Кохов, А.Б.Грызунов

В в е д е н и е

В настоящее время для решения задач автоматизации проектирования и конструирования различных объектов находят все более широкое применение аппарат теории графов. Графовые модели адекватно отображают структурно-топологические свойства объектов проектирования. Они позволяют перейти от рассмотрения конкретных объектов проектирования к их абстрактным моделям, что дает возможность строить математически обоснованные алгоритмы проектирования, находить простые решения, эффективно использовать ЭВМ.

В САПР радиоэлектронной аппаратуры выделены два класса процедур проектирования: анализ и синтез. В процедурах синтеза разрабатываются, а в процедурах анализа - оцениваются варианты построения объектов. Различают процедуры структурного и параметрического синтеза. При структурном синтезе определяется структура объектов, а при параметрическом - численные значения параметров элементов структуры объекта.

Поскольку целью анализа объекта является установление соответствия синтезированной структуры исходному описанию, то анализ, по-другому, называют верификацией объекта. Различают структурную и параметрическую верификации объекта [1].

В работе дано описание архитектуры и функционального назначения подсистем, а также приведены основные характеристики пакета прикладных программ (ППП) АИСТ-С, предназначенного для решения задач анализа и синтеза структур, возникающих в САПР радиоэлектронной аппаратуры.

Основная направленность ППП АИСТ-С в прикладной области - автоматизация выполнения структурной верификации схем, покрытия схемы набором типовых подсхем и использования накопленного опыта проектирования. Разработанный ППП позволяет производить структурно-топологический анализ и синтез графовых моделей микросхем с числом вершин до 10000 на основе компактного представления информации о графах и быстрых алгоритмов распознавания изоморфизма, изоморфного вложения и определения максимального изоморфного пересечения графов, учитывающих специфику предметной области.

## 1. Задача структурной верификации схем

При разработке САПР топологий интегральных микросхем обычно преследуется цель максимально полного автоматического контроля исходных данных, а также промежуточных и окончательных результатов проектирования. Это объясняется, с одной стороны, сложностью изготовления фотошаблонов и, следовательно, большой вероятностью ошибок, а с другой стороны, возможностью формализации контрольных операций. Поэтому одним из наиболее эффективных методов является анализ и контроль топологии интегральной микросхемы с использованием ЭВМ.

Наиболее трудоемкой процедурой, осуществляющей полный контроль и анализ разработанного топологического варианта интегральных микросхем, является процедура структурной верификации, т.е. восстановление принципиальной схемы интегральной микросхемы или ее части и сравнение ее с исходной.

Обычно при проектировании топологии интегральных микросхем стремятся сохранить информацию о нумерации элементов, что упрощает процесс контроля. Сохранение нумерации на всех этапах оказывается затруднительным при взаимодействии конструктора и ЭВМ через дисплей и для проектирования топологии по частям. Сравнение принципиальной и топологической схем без учета нумерации элементов сводится к решению задачи распознавания изоморфизма графов исходной принципиальной электрической схемы и ее топологического чертежа.

При установлении факта изоморфизма сравниваемых графов, делается вывод об отсутствии ошибок в топологическом варианте интегральной микросхемы. Если же выявлен факт неизоморфизма графов, то ошибки в топологической схеме существуют и, следовательно, необходимо их локализовать и исправить.

В данной работе локализацию ошибок в топологическом варианте интегральной микросхемы предлагается свести к решению задачи определения максимального изоморфного пересечения графов исходной принципиальной электрической схемы и ее топологического чертежа.

Таким образом, для решения задачи автоматизации структурной верификации схем необходимо иметь эффективные алгоритмы распознавания изоморфизма и поиска максимального изоморфного пересечения графов.

Описание алгоритмов распознавания изоморфизма и выделения максимального изоморфного пересечения графов приведено в [2, 3].

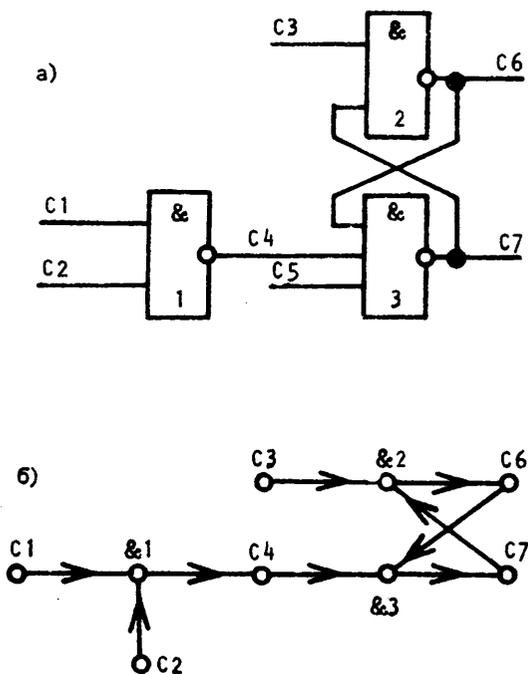
## 2. Задача покрытия функциональных схем модулями из заданного набора

Одной из первых задач, решаемых на этапе конструкторского проектирования в САПР радиоэлектронной аппаратуры, является задача преобразования функциональных и логических схем в прин-

ципальные, когда известны функциональные и конструкторские параметры модулей заданного набора. Данную задачу называют задачей покрытия [1].

Для решения задачи покрытия исходной схемы модулями из заданного набора  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ , где  $k$  - число типов модулей, следует исходную схему и модули ( типовые подсхемы) адекватно представить графовыми моделями.

Для построения этих моделей элементы схемы, контакты и цепи следует однозначно поставить в соответствие множеству вершин  $X$  графа  $G = (X, E)$ . Тогда для пары вершин  $x, y$  существует дуга  $\langle x, y \rangle \in E$ , если вершина  $x$  соответствует контакту схемы, от которого идет цепь  $y$  на вход некоторого



элемента; или вершина  $x$  соответствует элементу схемы, от выхода которого идет цепь  $y$ ; или вершина  $x$  соответствует цепи, которая идет на вход элемента  $y$ ; или вершина  $x$  соответствует цепи, которая с выхода элемента идет к контакту  $y$ . Полученный таким образом граф является ориентированным двудольным графом, так как любые две цепи (любые два эле-

Рис. 1

мента или контакта) в полученном графе будут соответствовать несмежным вершинам. Типы элементов схемы ('И-НЕ', 'ИЛИ-НЕ', 'КОНТАКТ' и т.д.) кодируются соответствующими метками вершин графа.

На рис. 1 приведен пример типовой подсхемы (а) и ее графовой модели (б).

Применив к графу исходной схемы и графам типовых подсхем алгоритм поиска изоморфного вложения графов, можно выделить множество всевозможных вложений в заданную схему каждой из подсхем, представленных графами  $G_1, G_2, \dots, G_k$ , т.е. множество  $\Phi = \Phi_1 \cup \Phi_2 \cup \dots \cup \Phi_k$ .

Задача оптимального покрытия графа схемы графами типовых подсхем приводит к задаче определения экстремального (в смысле некоторого априорно заданного критерия) подмножества  $\Phi^* \subseteq \Phi$ . Пусть задан критерий оптимальности покрытия, заключающийся в обеспечении максимума числа покрытых элементов схемы. Допустим, будем считать покрытие, в котором для любой пары  $\varphi_i, \varphi_j \in \Phi^*$  ( $\varphi_i \in \Phi_{i_k}, \varphi_j \in \Phi_{j_1}$ ) выполняется следующее условие:

$$x \in X_{G_k} \setminus X_{G_k}^C, \quad y \in X_{G_1} \setminus X_{G_1}^C \quad (\varphi_i(x) \neq \varphi_j(y)),$$

где  $X_G^C$  - множество вершин графа  $G$ , соответствующих цепям исходной схемы. Иначе говоря,  $\varphi_i$  и  $\varphi_j$  могут входить одновременно в некоторое покрытие схемы, если они не пересекаются на множестве вершин, соответствующих элементам схемы.

Для построения удовлетворяющего этим условиям оптимального покрытия предлагается перейти от рассмотрения множества  $\Phi$  к графу  $G(\Phi)$  перекрывания элементов  $\Phi$ . В графе  $G(\Phi)$  пара вершин  $\varphi_i$  и  $\varphi_j$  смежна тогда и только тогда, когда  $\varphi_i$  и  $\varphi_j$  могут одновременно входить в некоторое покрытие схемы. Каждой вершине этого графа припишем вес, равный числу

элементов схемы, покрываемых вложением  $\Phi \in \Phi$ , соответствующим этой вершине.

В графе  $G(\Phi)$  каждому допустимому покрытию схемы соответствует некоторая клика (полный подграф). Оптимальному покрытию, очевидно, соответствует клика с максимальным суммарным весом входящих в нее вершин.

На рис. 2 приведен фрагмент логической схемы и его графовая модель. Возможные вложения типовой подсхемы (рис. 1) в исходную схему выделены на рис. 2:

1. (C1-C4) (C2-C5) (C3-C9) (C4-C11) (C5-C1)  
(C6-C6) (C7-C10) (&1-&2) (&2-&5) (&3-&6)
2. (C1-C3) (C2-C8) (C3-C12) (C4-C13) (C5-C1)  
(C6-C5) (C7-C14) (&1-&4) (&2-&7) (&3-&8),

Эти вложения пересекаются лишь на множестве цепей схемы и поэтому могут одновременно входить в ее покрытие.

Во многих случаях при проектировании встречаются схемы, очень похожие, но не эквивалентные друг другу. Поэтому целесообразно использовать накопленный опыт проектирования с введением дополнительного правила проектирования. Разработчики вводят описание своей схемы, а одна из проблемных подсистем САПР анализирует функции каждого из элементов схемы. Затем система просматривает свою базу данных, чтобы установить, не содержится ли в ней идентичная схема, реализованная более рационально, или схема, максимально похожая. Если схема, введенная разработчиком, превосходит все схемы, уже имеющиеся в базе данных, то система сохраняет эту схему, чтобы использовать ее в будущем.

Таким образом, задача покрытия схем и задача использования опыта проектирования сводятся к математическим задачам изоморфного вложения графов и поиска максимального изоморфного пересечения графов, описание которых приведено в [3].

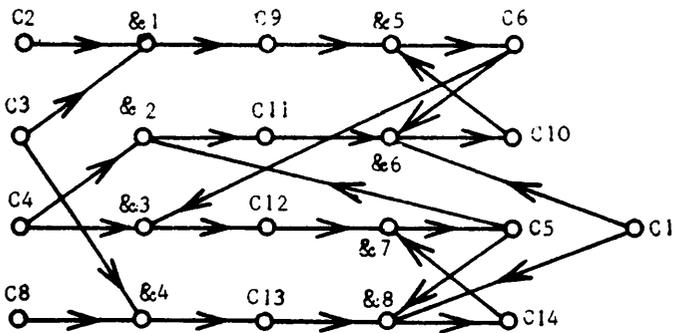
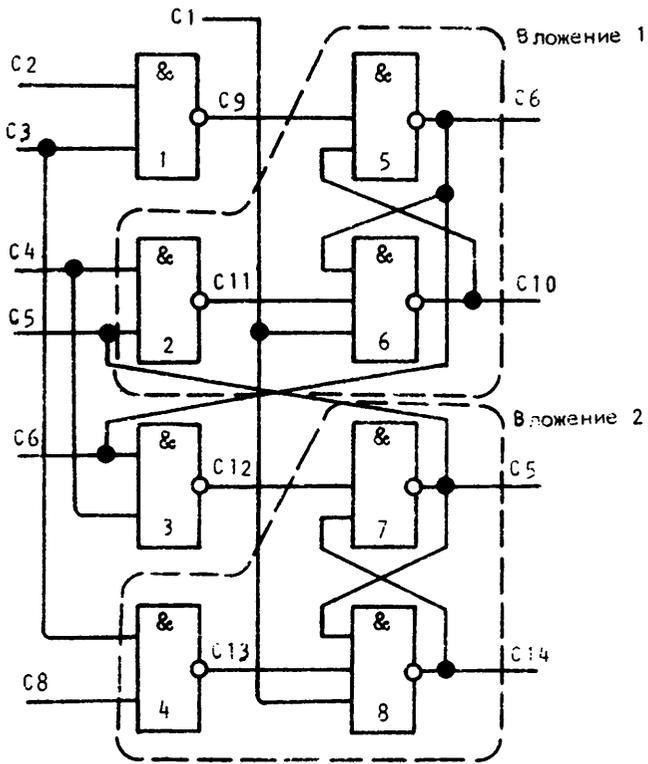


Рис. 2. Фрагменты исходной схемы и ее графовая модель

### 3. Общая архитектура и основные характеристики ППП АИСТ-С

В Московском энергетическом институте на кафедре прикладной математики разработан и используется в учебном процессе ППП АИСТ-С, который включен в состав программного обеспечения учебно-исследовательских САПР радиоэлектронной аппаратуры.

ППП построен по иерархическому принципу и имеет три уровня иерархии, представленные на рис. 3.

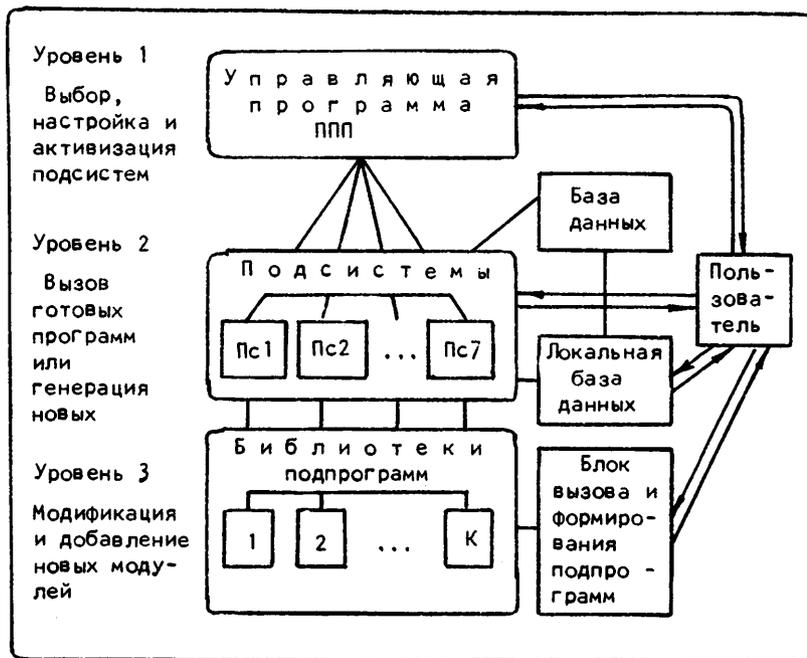


Рис. 3

На первом уровне пользователь взаимодействует в режиме диалога с управляющей программой пакета с целью выбора подсистемы, решающей задачу данного класса, ее параметрической наст-

ройки и активизации. Диалог на этом уровне предназначен для сообщения системе информации о классе решаемой задачи.

На втором уровне иерархии пользователь взаимодействует со своей подсистемой, базой данных системы и локальной базой данных и результатов. На этом уровне подсистема дает возможность использовать стандартные схемы генерации алгоритмов на основе модулей из библиотеки готовых модулей, либо сформировать из этих модулей новый алгоритм. Пользователю доступна информация из базы данных системы (накопленные результаты, данные, тесты и т.д.). В пределах одного сеанса работы с ППП результаты и данные хранятся в локальной базе данных пользователя.

На третьем уровне иерархии пользователь взаимодействует непосредственно с совокупностью библиотек подпрограмм пакета и может производить их модификацию путем разработки и включения в библиотеки собственных модулей и схем генерации алгоритмов. Заметим, что на втором уровне модификация пакета не допускается.

Каждая из подсистем представляет собой функционально независимую часть пакета, ориентированную на решение определенного класса задач. Приведем назначения подсистем и классы решаемых ими задач.

Пс1 - подсистема структурно-функционального моделирования, предназначенная для построения графовых моделей объектов проектирования по их формализованному описанию; ввода и вывода стандартных представлений графовых моделей и визуализации результатов решения задачи. Основная проблемная задача, решаемая в Пс1, связана с адекватностью моделирования структурно-топологических свойств объектов проектирования.

Пс2 - подсистема структурной верификации схем, т.е. сравнения графовых моделей объектов проектирования по эквивалентности и локализации мест неэквивалентности. Основные проблем-

ные задачи, решаемые в Пс2, связаны с распознаванием изоморфизма и построением максимального изоморфного пересечения графовых моделей.

Пс3 - подсистема структурного покрытия схем заданным набором типовых подсхем с оптимизацией по числу соединений между подсхемами. Основная проблемная задача, решаемая в Пс3, связана с построением изоморфного вложения графовых моделей.

Пс4 - подсистема "опыт проектирования", в которой на основе анализа функций каждого из элементов схемы и просмотра базы данных (Пс7) устанавливается соответствие с ранее реализованной схемой или выделяется максимально похожая схема. Основная проблемная задача, решаемая в данной подсистеме, связана с определением максимального изоморфного пересечения по набору графов.

Пс5 - подсистема планаризации, определения числа планарности и толщины графовой модели проектируемого объекта. Основная проблемная задача - распознавание гомеоморфных вложений  $K_5$  и  $K_{3,3}$  в графовую модель проектируемой схемы.

Пс6 - подсистема анализа инвариантных свойств структур и их применения для сокращения перебора или решения NP-полных задач анализа и синтеза структур в САПР радиозлектронной аппаратуры. Основная проблемная задача, решаемая в Пс6, связана с выделением неэквивалентных частей структуры и определением характеристик симметрии структуры (орбит, орбит стабилизаторов и фиксаторов группы автоморфизмов графа и др.).

Пс7 - база структурно-функциональных моделей объектов проектирования. Предназначена для использования опыта проектирования и выделения набора унифицированных типовых модулей. Основная проблемная задача - задача типизации, связанная с поиском максимального изоморфного пересечения графов.

В целом ППП АИСТ-С представляет собой пакет со сложной структурой, позволяющий пользователю быстро активизировать

работу необходимой подсистемы в интерактивном режиме, построить и выполнить требуемый алгоритм, либо получить информацию о невозможности его построения средствами системы. Диалог пользователя с пакетом реализован стандартными средствами ОС РВ 3.0 для СМ ЭВМ. Основной язык программирования - ФОРТРАН-4. Общее количество модулей - 121. ППП работает при наличии оперативной памяти не менее 128 К и использует 2 накопителя на магнитных дисках типа ИЗОТ-1370. Размерность анализируемых графовых моделей - до 2 тыс. вершин.

ППП АИСТ-С адаптирован для работы в ОС ЕС ЭВМ и позволяет анализировать графовые модели размерностью до 10000 вершин (со средней степенью 3) на ЕС ЭВМ.

В табл. 1 приведены результаты экспериментального исследования алгоритмов распознавания изоморфизма и локализации места неизоморфизма графовых моделей схем. Формула, дающая приближенную зависимость времени  $T$  от числа вершин  $P$  графа со степенями вершин от 3 до 5, при распознавании изоморфизма имеет вид:

$$T = 0.0003 \cdot P^{1.8} \text{ (секунд для ЕС-1045).}$$

В табл. 2 приведены результаты экспериментального исследования алгоритмов распознавания изоморфного вложения графа  $G_1$  в граф  $G_2$  и построения покрытия графа.

ППП АИСТ-С является инструментальным средством, доступным широкому кругу пользователей, так как может использоваться на больших (ЕС ЭВМ), средних (СМ-ЭВМ) и малых ЭВМ ("Электроника-60"). Он предназначен для автоматизации ручных процедур проектирования в САПР радиоэлектронной аппаратуры на основе использования алгоритмов распознавания изоморфизма, изоморфного вложения и поиска максимального изоморфного пересечения, образующих инвариантное ядро задач структурного различения схем.

Т а б л и ц а 1

Г р а ф ы		Среднее время решения задачи					
		Изоморфизм			Локализация места неадекватности		
Число вершин	Средняя степень вершин	Число пар	СМ-1420 (сек)	ЕС-1045 (сек)	Число пар	СМ-1420 (сек)	ЕС-1045 (сек)
150	4.0	12	11	3	16	36	10
540	3.9	9	113	25	8	408	113
2160	3.2	5	1366	301	4	4922	1428
10300	2.6	3	-	5017	3	-	-

Т а б л и ц а 2

Г р а ф ы				Среднее время поиска одного вложения		Все-го вло-же-ний	Число нез-вива-лент-ных вло-же-ний	Общее время поиска покрытия	
Граф $G_1$		Граф $G_2$		СМ-1420 (сек)	ЕС-1045 (сек)			СМ-1420 (сек)	ЕС-1045 (сек)
$ X $	$ E $	$ X $	$ E $						
12	25	20	50	0.11	0.03	2	2	0.32	0.06
20	50	150	350	0.16	0.04	48	9	8.22	1.95
150	350	540	1400	22.3	5.47	4	4	89.3	21.9
150	350	2160	5160	-	7.58	16	16	-	125.1
150	350	10800	20368	-	12.4	80	80	-	1019.2

## Л и т е р а т у р а

1. Системы автоматизированного проектирования в радиоэлектронике: Справочник /Под ред. И.П.Норенкова. - М.: Радио и связь, 1986. - 368 с.

2. ГРЫЗУНОВ А.Б., КОХОВ В.А. Методы автоматизированного конструирования алгоритмов распознавания изоморфизма графов на основе инвариантов //Методы и программы решения оптимизационных задач на графах и сетях. Новосибирск, 1984. -Ч.2. -С.33 - 35.

3. ГРЫЗУНОВ А.Б., КОХОВ В.А. Метод сокращения перебора на основе учета симметрии при решении NP-полных задач на графах /Моск. энерг. ин-т. - М., 1987. - 58 с. Деп. ВИНТИ, 18.07.87 № 6029-В87.

Поступила в ред.-изд.отд.

30 марта 1988 года