

*П.И. ДМИТРИЕВ, М.С. ЛУЗИН,
С.Ю. ЛУЗИН, А.Н. КОЛОСОВ, О.Б. ПОЛУБАСОВ, В.А. ШУБАРЕВ*

Россия, Санкт-Петербург, АО “Авангард”
e-mail: luzin1@rol.ru, pbas@rol.ru

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МИКРОСБОРОК “FREESTYLE_TF”**

*Описаны особенности моделей и алгоритмов, используемых в системе
автоматизированного проектирования однослойных гибридных схем.*

Одним из основных направлений развития современных электронных средств (ЭС) является ее микроминиатюризация.

Электронные САПР учитывают современные тенденции, и все больше внимания уделяют проектированию многослойных коммутационных структур. Тем не менее, в некоторых областях техники используются и однослойные устройства (печатные платы, тонкопленочные микросборки, некоторые виды биполярных микросхем). Но если для проектирования двухслойных и многослойных коммутационных структур существует сотни САПР, с той или иной степенью эффективности автоматизирующих процесс синтеза топологии, то для однослойных структур такие САПР на рынке отсутствуют. Поэтому вплоть до настоящего времени проектирование однослойных коммутационных структур осуществлялось вручную.

Следует отметить, что в 70-80-х годах вопросам автоматизации проектирования устройств с одним слоем коммутации было посвящено большое количество публикаций [1-6], но практического воплощения в виде САПР эти работы не получили.

Известные подходы к проектированию устройств с однослойной коммутацией в качестве обязательных процедур включают процедуры выделения планарной части схемы и построения плоского чертежа схемы.

Пусть схема задана в виде частично ориентированного графа G . На этапе планаризации требуется выделить максимальный планарный подграф графа G , удалив некоторые ребра и вершины. Задача анализа планарности графа G , как правило, лишена смысла, так как любая реальная схема дает граф, который не является планарным. Однако

математический аппарат анализа планарности хорошо разработан, и потому в ряде работ существующие алгоритмы анализа планарности используются как основа для построения алгоритмов планаризации графа схемы. При этом необходимо, во-первых, разработать формальную процедуру удаления из графа схемы непланарных ребер и, во-вторых, учесть наличие в графе ребер, входящих в модели элементов, которые нельзя удалять в процессе планаризации.

Среди известных алгоритмов анализа планарности наилучшими являются алгоритмы Лемпела-Ивена-Цедербаума [7], Хопкрофта-Тарьяна [8] и Рабина [9, с.69]. Их преимущества определяются возможностями построения эффективных вычислительных процедур планаризации графа схемы для ЭВМ.

Существующие алгоритмы планаризации графа ориентированы на работу с планарными графами и не позволяют выделить в непланарном графе максимальный планарный суграф, т.е. не гарантируют нахождение варианта с минимальным числом непланарных ребер. Кроме того, существующие алгоритмы планаризации графа находят лишь одну из множества плоских укладок, не позволяя при этом учесть геометрические ограничения и критерии (минимум площади, занимаемой топологическим рисунком; минимум суммарной длины соединений; минимизация длины перемычек и т.д.).

В существующих подходах практически отсутствуют процедуры размещения и трассировки как оптимизационные задачи, т.е. в том понимании, в котором они присутствуют при проектировании двух- и многослойных коммутационных структур.

Из вышеизложенного вытекает бесперспективность использования моделей, алгоритмов и программных средств, основанных на получении плоских укладок графа [1-6], в автоматизированном проектировании гибридных интегральных микросхем с одним слоем коммутации, прежде всего, из-за отсутствия возможности оптимизации полученных решений.

Альтернатива - использование средств гибкой топологической трассировки [10-13], которые позволяют получить глобальный минимум числа переходных отверстий, осуществить перемещение компонентов, не нарушая целостности разводки. Это создает основу для организации эффективного процесса проектирования устройств с одним слоем коммутации за счет получения плана размещения, быстрой трассировки с последующими итерациями деформации топологии и перетрассировки, дополненными интерактивным редактированием.

Из вышеизложенного вытекают следующие задачи, которые были поставлены и решены при создании эффективных программных средств проектирования устройств с однослойной коммутацией:

- адаптация метода гибкой топологической трассировки для проектирования устройств с однослойной коммутацией;
- разработка моделей компонентов, учитывающих особенности и ограничения топологического подхода;
- разработка эффективных методов автоматизированного размещения компонентов;
- разработка методов обеспечения контролепригодности топологии микросборки;
- разработка архитектуры системы автоматизированного проектирования, обеспечивающей сквозной цикл проектирования тонкопленочных микросборок;
- разработка методики проектирования устройств с однослойной коммутацией на основе топологических методов.

Программный комплекс **FreeStyleTF**, разработанный на основе выполненных исследований, предназначен для автоматизированного проектирования тонкопленочных микросборок, начиная от создания схемы электрической принципиальной и заканчивая выпуском комплекта конструкторской документации на микросборку.

FreeStyleTF создавался на базе двух уже существующих программ. Первая из них, программа трассировки и редактирования FreeStyle Router [10-13], вторая - программа автоматического размещения AuTOP [14].

Обе эти программы были существенно доработаны с учетом требований, предъявляемых при проектировании микросборок.

Были модифицированы модели представления компонентов, алгоритмы для работы с новыми моделями компонентов. Разработаны и реализованы модули, осуществляющие общее управление процессом проектирования, начальный ввод данных, выпуск конструкторской документации в соответствии с ЕСКД. Создана архитектура базы данных для хранения конструкторских компонентов, а также форматы данных для обмена между модулями системы автоматизированного проектирования.

Особенности представления компонентов

Типичная технология тонкопленочных микросборок с однослойной коммутацией использует элементы двух видов: навесные и пленочные. Геометрия пленочных резисторов зависит от сопротивления, мощности, точности и других факторов. Необходимый набор геометрических размеров хотя и конечен, но очень велик, причем повторяемость от проекта к проекту не гарантируется, поэтому иметь его весь в библиотеке нецелесообразно. Альтернативное решение - программа, которая рассчитывает и автоматически генерирует резисторы с нужными параметрами по мере возникновения потребности.

При формировании контактных площадок пленочных резисторов необходимо учитывать возможность неточного совмещения масок резистора и проводника. Для этой цели вводится припуск масок резистора и, соответственно, вводится дополнительная зона металлизации, которая при этом формально контактом не является, поскольку к ней не должен подходить проводник.

Таким образом, пленочный резистор как компонент базы данных состоит из пяти частей: собственно резистора, двух зон металлизации между резистором и контактными площадками и двух контактных площадок (рис.2).

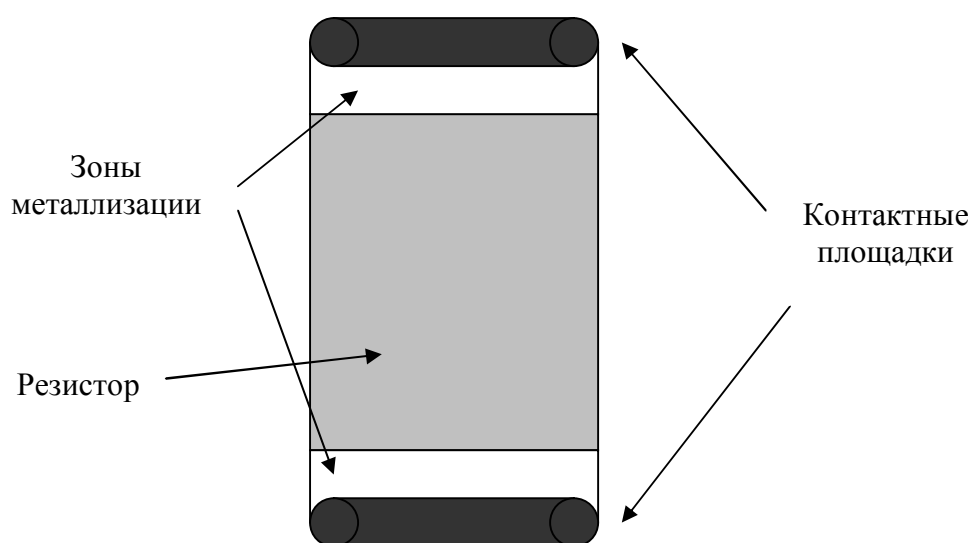


Рис. 2. Модель пленочного резистора

Специфика навесных элементов такова, что они присоединяются к подложке золотыми проволочными волосками, места приварки которых не определены жестко, а могут варьироваться в некоторых пределах, причем нельзя делать волоски слишком короткими или слишком длинными.

Необходимо иметь специальную модель, позволяющую легко изменять координаты точек приварки волосков.

При разработке системы автоматизированного проектирования целесообразно использовать две модели компонента: первая - традиционная модель с жестко фиксированным положением корпуса компонента, его контактов и связей контактов с

корпусом; вторая - модель в виде подсхемы, в которой корпус и контакты представлены в виде отдельных компонентов, связанных электрическими цепями.

Выбор определенной модели должен быть привязан к выбору режима работы системы. Так, например, первую модель целесообразно использовать при автоматическом размещении компонентов, вторую – при автоматической трассировке, когда важно учитывать возможность проведения трасс между корпусом и контактом. Также, для того чтобы при редактировании можно было использовать обе модели, необходимо наличие нескольких редакторов, причем переход от одной модели к другой должен производиться простым переключением режимов редактирования.

Модель навесного компонента состоит из корпуса компонента, контактов компонента и соединений контактов компонента с его корпусом. Поскольку при автоматической трассировке связи контактов компонента с корпусом трассируются в “золотом” слое, то во избежание прохода трасс через корпус компонента (обхода контактов корпуса другими соединениями) в описание корпуса добавлена зона запрета трассировки.

Модель навесного компонента представлена на рис. 3.

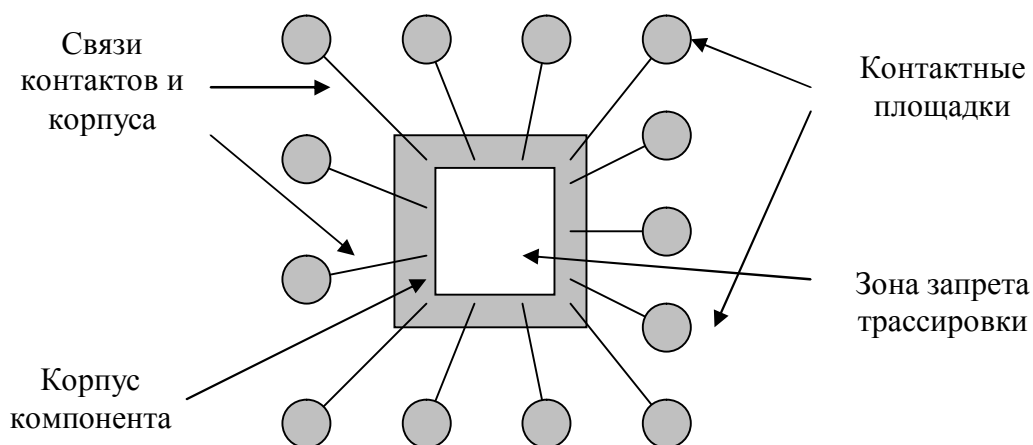


Рис. 3. Модель навесного компонента (микросхема, транзистор, диод и т.д.)

Особенностью топологического трассировщика является отсутствие углов в описании топологических объектов (фрагментов трасс, контактных площадок). Простейшая форма контактной площадки, обладающая таким свойством, – круг. При описании некруглых контактных площадок необходимо использовать некоторые приемы, гарантирующие выполнение конструктивно-технологических ограничений.

Простейший способ - замена квадрата описанной окружностью, но при этом, чем крупнее квадрат, тем больше потери площади монтажного пространства.

Второй вариант - замена квадрата овалом (рис. 4), когда на двух противоположных сторонах квадрата добавляются “шапочки” в виде полукругов, построенных на сторонах квадрата. Подобный вариант экономичнее первого в части потерь площади монтажного пространства, однако для крупных контактных площадок величина потерь может быть значительной. Следует отметить, что при замене квадратной контактной площадки овалом необходимо правильно выбирать ориентацию “шапочек”.

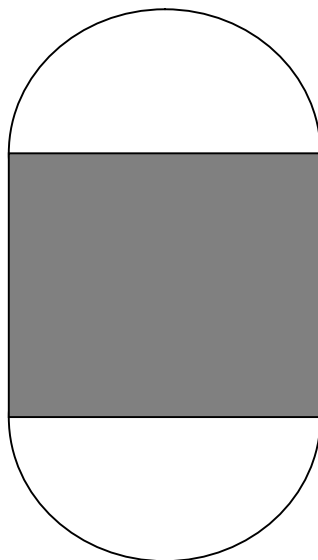


Рис. 4. Замена квадратной контактной площадки площадкой в форме овала

Третий вариант – вписанная в квадрат окружность с четырьмя барьерами для трассировки (рис. 5) или овал с барьерами.

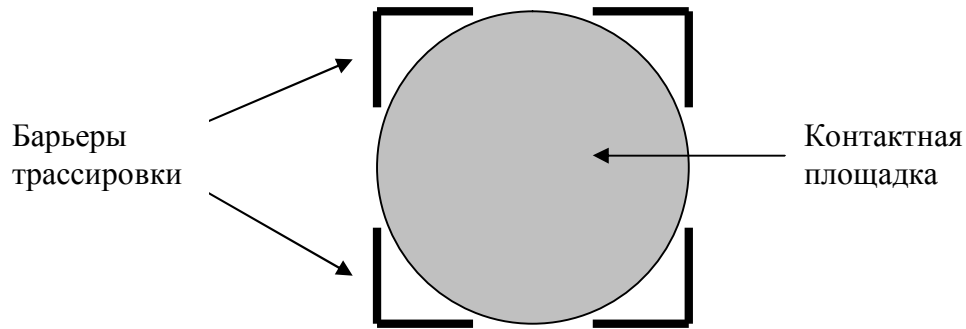


Рис. 5. Замена квадратной контактной площадки - круглой с барьерами

Последний вариант – самый экономичный в смысле потерь площади, однако само описание значительно сложнее, поэтому при описании мелких некруглых контактных площадок лучше использовать второй вариант, а при описании крупных контактных площадок - третий.

Особенности алгоритмического обеспечения

Размещение

Подсистема автоматического размещения компонентов использует модификацию силового алгоритма, описанного в [14].

Математическая модель силового размещения - квадратичный функционал и минимизирующая его система линейных уравнений.

Функционал Φ , выражающий сумму квадратов длин проводников,

$$\Phi = \sum_{i,j} a_{ij} (x_i - x_j)^2 + \sum_{i,j} a_{ij} (y_i - y_j)^2,$$

где x и y - координатные векторы для n ячеек, а a_{ij} представляет связность ячеек i и j , имеет единственный минимум, который можно найти, приравняв нулю все частные производные:

$$\frac{\delta\Phi}{\delta x_i} = 0 \Rightarrow \sum_j a_{ij} (x_i - x_j) = 0,$$

$$\frac{\delta\Phi}{\delta y_i} = 0 \Rightarrow \sum_j a_{ij} (y_i - y_j) = 0;$$

После очевидных преобразований получим следующие равенства:

$$x_i = \frac{\sum_j a_{ij} x_j}{\sum_j a_{ij}}, \quad y_i = \frac{\sum_j a_{ij} y_j}{\sum_j a_{ij}};$$

В работах [15,16] показано, что силовое размещение позволяет уложить на плоскости планарную точечную модель схемы без пересечений, что является сильным аргументом в пользу применения этого метода для схем с однослойной коммутацией.

Однако следует сделать несколько замечаний.

1. Существуют быстрые итерационные способы решения этой системы уравнений, которые не требуют обращения матриц. Задача размещения может быть решена последовательным расчётом оптимальных положений каждой ячейки, считая остальные ячейки неподвижными. Это соответствует процедуре покоординатного спуска. Поскольку целевой функционал не овражный, то для получения хорошего приближения достаточно всего нескольких уточняющих итераций. Число необходимых итераций зависит от близости начального расположения ячеек к оптимальному, от диаметра графа связей и от порядка обработки ячеек. Видно, что число операций на каждой итерации пропорционально числу ненулевых элементов матрицы \mathbf{A} , то есть числу связей. Коэффициенты связи a_{ij} в процессе расчёта не изменяются.

2. Силовое размещение даёт приемлемое решение только для весьма специфических сетей, на реальных же примерах элементы имеют тенденцию скучиваться, перекрываться, поэтому полученное силовым методом решение всегда нуждается в коррекции. Для этого используются методы дискретизации координат элементов, например, метод приведения по квадрантам.

3. Силовое размещение минимизирует сумму квадратов длин и, вопреки утверждениям некоторых авторов, не обеспечивает глобального минимума суммарной длины проводников.

Показано, что использование квадратичного функционала (минимума суммы квадратов длин проводников), весьма привлекательное из-за единственности экстремума, может приводить к существенным отклонениям от оптимума по критерию минимума суммы длин проводников.

Несоответствие критериев особенно сказывается, если закрепленные элементы лежат за пределами допустимой области размещения. При дискретизации решения, основанной на разбиении монтажного пространства, оптимальная точка может легко оказаться за пределами области размещения.

Предложена методика вычисления оптимального расположения элемента, близкого к расположению, обеспечивающему минимум суммарной длины соединений, но обладающая меньшей комбинаторной сложностью.

Для снижения влияния указанного негативного фактора при подсчете используются не координаты закрепленных элементов, лежащих за пределами допустимой области размещения, а координаты проекций их центров на прямоугольник, охватывающий область размещения.

Поскольку после каждого разделения размеры области размещения уменьшаются, то происходит постепенная коррекция координат элементов, приближающая их к точке, оптимальной по критерию минимальной суммарной длины.

Обеспечение контролепригодности конструкции

В процессе создания системы сформулирован и решен ряд специфических задач, возникающих при синтезе топологии тонкопленочных микросборок, связанных с анализом контролепригодности топологии микросборки: проверка наличия контрольных точек для измерения сопротивления каждого из резисторов; выделение в схеме подсхемы, содержащей контур из резисторов и разрыв контуров с минимизацией числа дополнительных контрольных точек.

При изготовлении микросборок для контроля сопротивления пленочных резисторов необходимо обеспечить возможность доступа щупов измерительного прибора к проводникам, инцидентным контролируемым резисторам. Для этого в защитном слое, покрывающем проводники, открываются небольшие окна. Обычно в качестве измерительных площадок используются уже имеющиеся контактные площадки для приварки проволочных выводов навесных компонентов. Но если инцидентная резистору цепь не содержит навесных компонентов, то в эту цепь необходимо добавить специальную контрольную точку.

Если схема содержит контур из резисторов, то измерить сопротивление отдельно взятого резистора оказывается невозможным, так как остальные резисторы контура образуют цепь, включенную параллельно контролируемому резистору и искажающую результат измерений. В этом случае один из проводников контура разрывают, а после проверки сопротивлений резисторов восстанавливают целостность разорванного проводника при помощи проволочной перемычки.

Если построить граф, вершинам которого соответствуют цепи, а рёбрам - плёночные резисторы, то минимально необходимое количество таких технологических перемычек будет совпадать с цикломатическим числом графа (которое определяется как

разность между количеством рёбер и количеством связных компонент). Одним из самых простых способов разрыва в графе всех циклов является следующий: построить какой-нибудь остовный подграф и разорвать все остальные рёбра.

Раз есть много вариантов расстановки технологических перемычек, то появляется соблазн совместить задачу с предыдущей, то есть разместить перемычки так, чтобы их контактные площадки одновременно можно было бы использовать и в качестве контрольных точек, тем самым уменьшив количество дополнительно вводимых контрольных точек. Эта задача решается автоматически, и пользователю предлагается либо воспользоваться полученным решением, либо разорвать контуры вручную на основе предоставляемой информации о найденных “резисторных контурах”.

Состав комплекса

В состав программного комплекса для автоматизированного проектирования микросборок (рис. 6) входит:

- 1) Редактор библиотечных элементов
- 2) Генератор пассивных элементов.
- 3) Генератор корпуса микросборки.
- 4) Модуль ввода схемы (текстовый редактор списка соединений и графический редактор схемотехнический)
- 5) Программа автоматического размещения.
- 6) Программа автоматической трассировки и топологический редактор.
- 7) Модуль генерации фотошаблонов и конструкторской документации.

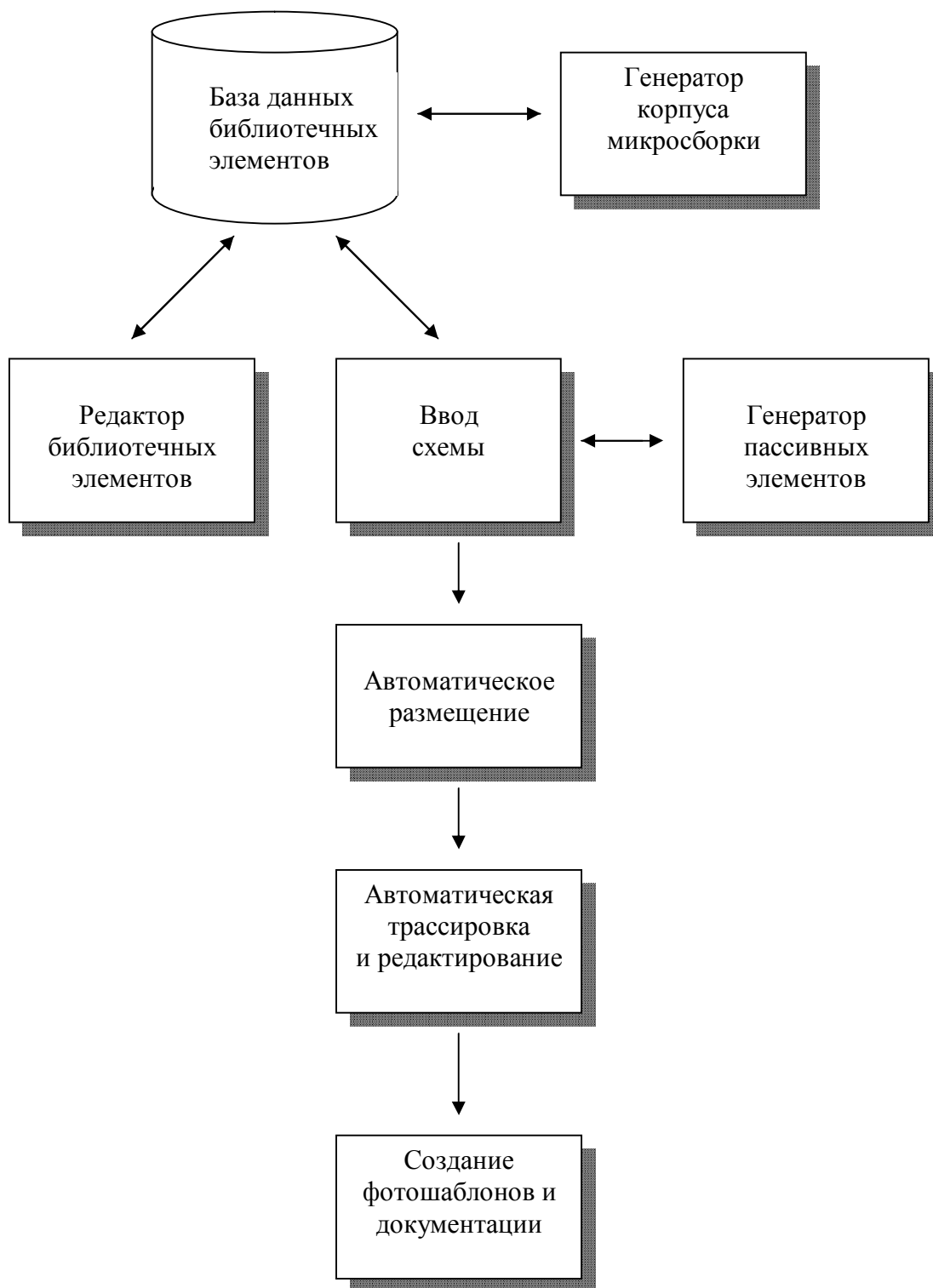


Рис. 6. Состав программного комплекса FreeStyle TF

Заключение

Разработана система автоматизированного проектирования тонкопленочных микросборок с одним слоем коммутации FreeStyle TF, основанная на применении метода гибкой топологической трассировки, включающая эффективные средства автоматизированного размещения компонентов и обеспечения контролепригодности микросборок, обеспечивающая автоматизированный выпуск комплекта фотошаблонов и конструкторской документации на изделие.

Сравнительный анализ результатов ручного и автоматизированного проектирования продемонстрировал несомненное преимущество *FreeStyleTF*, заключающееся в сокращении в десятки раз сроков проектирования при одновременном существенном повышении качества и технологичности проектируемых изделий (сокращение суммарной длины проводников до 50%, уменьшение числа перемычек, возможность повышения степени интеграции без изменения проектных норм).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Арбузов В.А., Буркин Ю.В., Лебедев Б.В., Шигина Н.Н. Этап планаризации в топологическом проектировании микросборок с однослойной коммутацией. – В сб.: Автоматизация конструкторского проектирования РЭА и ЭВА. - Пенза, ПДНТП, 1984, с. 62-63.
2. Бершадский А.М. Пакет прикладных программ системы автоматизации конструкторского проектирования гибридных БИС. - В сб.: Вычислительная техника, т. 9. - Каунас: Изд. КПИ, 1976, с. 9-11.
3. Бершадский А.М., Лебедев В.Б., Фионова Л.Р. Размещение разногабаритных элементов микросборок средствами пакета прикладных программ “Компакт”. // Электронная техника, сер. 10 Микроэлектронные устройства, вып. 3(39), 1983, с.31-33.
4. Гайфуллин Э.Ш., Старостина Л.А., Литвинова Л.Н. Размещение плоского графа ГИС, расположенного по концентрическим окружностям, с учетом метрики элементов. - В сб.: Вычислительная техника // КПИ, Каунас, 1982, с.76.
5. Львов Н.П., Петрова Г.В. Использование плоского графа для синтеза топологии интегральной схемы. - В сб.: Вычислительная техника // КПИ, Каунас, 1982, с.74-75.
6. Селютин В.А. Автоматизированное проектирование БИС. - М.: Радио и связь, 1982. - 113с.

7. Lempel A., Even A., Cederbaum I. An Algorithm for Planarity Testing of Graph. – Theory of Graphs, International Symp. Rome, Gordon and Breach, 1966, p. 215.
8. Хопкрофт Дж.Е., Тарьян П.Е. Изоморфизм планарных графов. – Кибернетический сборник, вып.12., 1975, с. 39-61.
9. Rubin F. An improved algorithm for testing the planarity of graph. // IEEE Trans. On Computers, 1975, vol. C-24, №2, p. 113-121.
10. Лузин С.Ю., Полубасов О.Б. Трассировка печатных плат. Новые методы решения старых проблем. // “САПР и графика”, 1997, №11, с. 58-59.
11. Лузин С.Ю., Полубасов О.Б. Топологическая трассировка: реальность или миф? // CHIP NEWS. - 2002. - №5. - С.42-46.
12. Полубасов О.Б. Эволюция гибкой трассировки. // Материалы IV международной конференции по мягким вычислениям и измерениям “SCM’2002”. - Санкт-Петербург. - 2002.
13. Полубасов О.Б. Глобальная минимизация количества межслойных переходов. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2001, №2, с. 3-9.
14. Полубасов О.Б., Зудин С.В. К вопросу о квадратичном размещении ячеек на БИС. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 1999, №5-6, с. 10-13.
15. Тетельбаум А.Я. Силовое размещение планарного графа. // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. - 1988. - №3. - С. 131-137.
16. Тетельбаум А.Я. Прямолинейная укладка графа с квазиминимальным числом пересечений ребер. // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. - 1989. - №2. - С. 173-175.