

Решение прикладных задач, связанных с методами обработки топологических компонентов посредством исследования их взаимных размещений

А. Н. Архангельский, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье [4] описаны методы обработки топологических компонентов (ТК), основанные на исследовании их взаимных размещений. К ТК относятся контактные площадки, проводники, области металлизации и т. д. В современных CAD/CAM-системах, предназначенных для проектирования и подготовки данных для изготовления печатных плат, существует множество задач, решение которых основывается на исследовании размещений ТК, например построение таблицы цепей на основании спроектированной топологии, контроль на предопределенные зазоры между ТК (DRC), подрезка контактных площадок, оптимизация толщин проводников и т. д. Эти задачи достаточно сложны, требуют значительных вычислительных ресурсов, алгоритмы их решения являются интеллектуальной собственностью фирм-разработчиков, что и определяет высокую стоимость этих систем. В статье на ряде конкретных примеров приводятся возможности предложенных методов для решения классических задач CAD/CAM-систем.

Ключевые слова: печатные платы, топология, проводник, контактная площадка

Applied Problems Solution Based on Methods for Processing of Topological Components by Studying their Relative Locations

A. N. Arkhangel'skiy, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article [4] describes methods for processing topological components (TC) based on the study of their mutual placements. TC includes contact pads, conductors, areas of metallization, etc. In modern CAD/CAM systems suitable for the design and preparation of data for the manufacture of printed circuit boards, there are many tasks that are based on the study of the placement of TC, for example, building a table of circuits based on the designed topology, monitoring for predefined gaps between TC (DRC), trimming contact pads, optimizing the thickness of conductors, etc. These tasks are quite complex, require significant computing resources, and the algorithms for solving them are the intellectual property of developer firms, which determines the high cost of these systems. The article uses a number of specific examples to show the possibilities of the proposed methods for solving classical problems of CAD/CAM systems.

Keywords: printed circuit boards, topology, conductor, contact platform

Введение

Современные САД/САМ-системы представляют собой программный продукт, обеспечивающий решение сложнейших задач, связанных с разработкой и подготовкой данных для печатных плат (ПП). К таким системам относятся Altium Designer [1], САМ-350 [2], Genesis 2000 [3] и еще целый ряд подобных разработок. В качестве примеров, решаемых в рамках САД/САМ-систем, можно привести следующие задачи:

- формирование таблицы цепей на основании существующей топологии;
- контроль топологии на установленные зазоры (DRC);
- подрезка контактных площадок;
- оптимизация толщин проводников и т. д.

Подобных задач можно привести еще немало. Все эти задачи сложны сами по себе, и к тому же решение осложняется количеством топологических компонентов (ТК) на ПП, которое может достигать десятков тысяч. В работе [4] представлены методы обработки, позволяющие решать подобные задачи. Цель этой статьи — демонстрация возможностей методов для решения задач, связанных с обработкой топологий.

Приведем основные положения из [4], которые потребуются нам для изложения сути методов.

Под ТК A будем понимать односвязанную область, охватываемую замкнутым контуром без самопересечений и касаний. При этом контур состоит из векторов, расположенных на линиях, описываемых уравнениями первого порядка, то есть

$$A = U_1^N [R_i(x_{i1}, y_{i1}), (x_{i2}, y_{i2})], \quad (1)$$

где R_i — вектор, $(x_{i1}, y_{i1}), (x_{i2}, y_{i2})$ — координаты его начальной и конечной точек, при этом конечная координата R_i совпадает с начальной координатой R_{i+1} .

Под преобразованием ТК мы будем понимать построение описания ТК, зависящего от взаимного расположения компонентов и семантики преобразования.

Семантика преобразований, подлежащих рассмотрению в данной работе, представляет собой логические операции над множествами геометрических точек, входящих в ТК, а именно «объе-

динение», «вычитание», «пересечение». Классическая трактовка этих операций приведена на рис. 1. На рис. 1, *а* приведены два ТК: A_1 и A_2 . Результаты логических операций представлены на рис. 1, *б*, *в*, *г*.

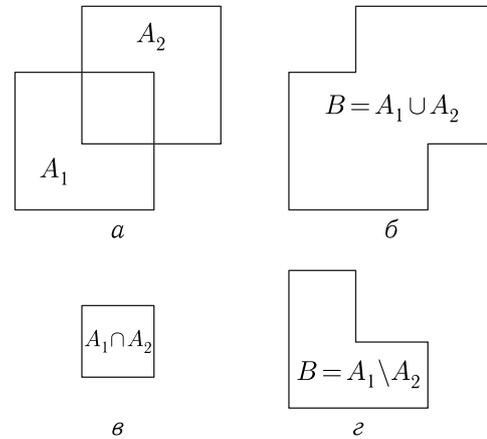


Рис. 1. Интерпретация семантики логических операций

В рамках этих терминов в [4] определены алгоритмы выполнения логических операций и структуры данных, позволяющих их реализовать.

В [4] определена математическая модель (см. рис. 2), обеспечивающая выполнение логических операций над геометрическими фигурами, не обремененными какими-либо специфическими требованиями, связанными со спецификой ТК, размещаемых на ПП.

На рис. 2 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ — начальные и конечные точки вектора R_i ;

$x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ — минимаксные координаты для проверки необходимости детального исследования размещения двух векторов;

A, B, C — коэффициенты уравнения прямой $Ax + By + C = 0$, проходящей через две точки $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$, при этом $A = y_2 - y_1; B = x_1 - x_2; C = y_1x_2 - x_1y_2$.

Составляющая V_i зависит от взаимного размещения (ВР) и наполняется по мере их обработки.

При решении конкретных задач, связанных с проблемами проектирования и изготовления ПП, возникает необходимость расширения структуры данных.

Как правило, результаты проектирования ПП представляются в виде множества ТК, в число которых входят контактные площадки (КП), полигоны для описания областей металлизации, проводники

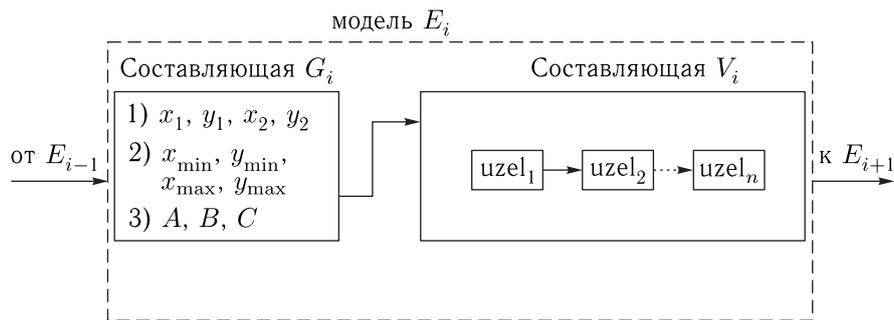


Рис. 2. Математическая модель, обеспечивающая выполнение логических операций над ТК

Тип: КП X_p, Y_p Номер $x_{\min}, y_{\min}, x_{\max}, y_{\max}$ Указатель на E_i $N_{\text{сер}}$ Резерв Резерв ...	Тип: проводник $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$ Толщина $x_{\min}, y_{\min}, x_{\max}, y_{\max}$ Указатель на E_i $N_{\text{сер}}$ Резерв Резерв ...	Тип: полигон $x_{\min}, y_{\min}, x_{\max}, y_{\max}$ Указатель на E_i $N_{\text{сер}}$ Резерв Резерв ...	Тип: отверстие $X_{\text{ц}}, Y_{\text{ц}}$ $x_{\min}, y_{\min}, x_{\max}, y_{\max}$ Диаметр Указатель на E_i Резерв Резерв ...
а	б	в	г

Рис. 3. Параметры структуры данных, необходимые для решения типовых задач обработки ТК

заданной ширины и отверстия сверления. На рис. 3 показаны примерные структуры данных, содержащие параметры, необходимые для решения типовых задач обработки ТК.

Далее рассмотрим назначение параметров:

а) для КП: X_p, Y_p — точка привязки КП;

«Номер» — номер КП в ряду КП. С номером, как правило, связана конфигурация КП;

$x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ — минимаксные координаты для проверки необходимости детального исследования ВР КП;

указатель на структуру V_i (см. рис. 2);

$N_{\text{сер}}$ — номер цепи, к которой относится ТК. Необходимость в наличии этого параметра связана с тем, что ТК в ПП разбиваются на группы, каждая из которых имеет свой идентификатор — « N цепи». При этом, как правило, ТК из разных групп обрабатываются по разным правилам.

Резервные параметры приводятся лишь для показа того, что данная структура не является окончательной и изменяется в зависимости от задачи;

б) для проводников: $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$ — координаты проводника;

«Толщина» — толщина проводника;

$x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ — минимаксные координаты для проверки необходимости детального исследования ВР проводника; дальнейшие параметры аналогичны параметрам КП.

в) для полигонов (области металлизации):

$x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ — минимаксные координаты для проверки необходимости детального исследования ВР полигонов; дальнейшие параметры аналогичны параметрам КП.

г) для отверстий: $(X_{\text{ц}}, Y_{\text{ц}})$ — координата центра отверстия;

$x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ — минимаксные координаты для проверки необходимости детального исследования ВР отверстий;

«Диаметр» — диаметр отверстия; дальнейшие параметры аналогичны параметрам КП.

Для упрощения восприятия текста введем следующие определения.

Под структурой данных в дальнейшем тексте будем понимать конструкции, приведенные на рис. 3. Под математической моделью, или просто моделью, будем понимать конструкцию данных,

показанную на рис. 2. Все ТК описываются конструкциями данных (см. рис. 3), которые представляют собой охватывающий контур. При выполнении логических операций над ТК, порождающих исследование ВР, формируется математическая модель (см. рис. 2). Перейдем к рассмотрению конкретных задач.

Подготовка информации для выпуска конструкторской документации (КД)

Приведем типовую топологию, формируемую в процессе проектирования ПП. На рис. 4, а топология представлена множеством (КП) (A_1, A_2, \dots, A_n) и областями металлизации (B_1, B_2, \dots, B_m), при этом рядом с каждой КП для ее иден-

тификации на рисунке размещен прямоугольник, освобожденный от цвета фона ПП.

Такое представление ТК может применяться в ряде случаев при проектировании и изготовлении ПП. При подготовке информации для выпуска КД ЕСКД требуется связанные области металлизации изображать единым полигоном (см. рис. 4, б).

Исходная топология перерабатывается следующим образом. Изначально необходимо получить единый контур G_1 , охватывающий области металлизации. Это достигается посредством выполнения операции $G_1 = B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_m$.

Далее формируется топология G_2 , определяемая как $G_2 = G_1 \setminus A_1 \setminus A_2 \setminus \dots \setminus A_n$.

Окончательное изображение G_3 определяется как $G_3 = G_2 \cup A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n$.

Расширение проводников при сохранении установленных между ними зазоров

В работе [5] описывается программное обеспечение (ПО), которое расширяет проводники ПП без нарушения установленных зазоров. Необходимость подобных преобразований возникает при разработке ПП 5-го класса точности, имеющих ширину проводников 0,1 мм и менее. При этом довольно часто происходит стравливание меди с токопроводящих элементов малой ширины. Опция, расширяющая проводники, имеется в Genesis 2000 [3].

В рамках систем CAD/CAM проводники $L1, L2$ (см. рис. 5) представляются двумя координатами $K1 = (x_1, y_1), K2 = (x_2, y_2)$, определяющими начальную и конечную точки проводника, а также «маской», перемещение которой из точки $K1$ в точку $K2$ и формирует проводник. Далее рассматривается ситуация, в которой «маска» принимает форму окружности. «Маска» имеет параметр диаметр D , определяющий ширину проводника.

Кроме того, при проектировании ПП устанавливается зазор Z (см. рис. 5) между токопроводящими элементами топологии. Изменение D не должно нарушать установленные зазоры. Очевидно, что расширение проводника разрешается далеко не везде. Поэтому перед расширением необходимо провести исследование ВР ТК и уже по его

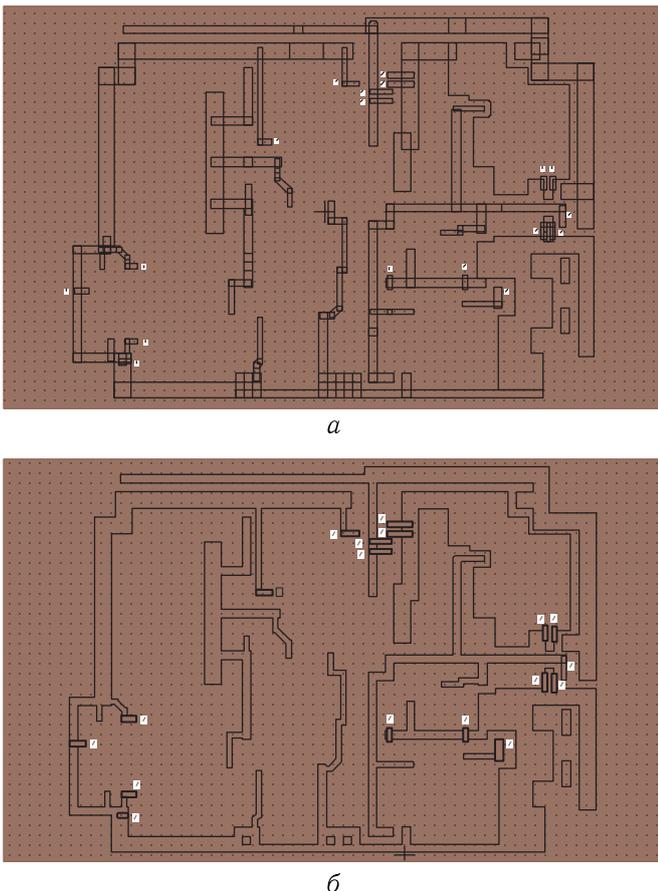


Рис. 4. а) Вид ТК после проектирования ПП; б) информация, выводимая в послойный чертеж

результатам принимать решение о расширении проводника. Изначально задается значение $D = D1$, определяющее ширину проводников, которые подлежат расширению, и $D = D2$, определяющее финальную ширину проводников. При этом на значение $D2$ накладывается ограничение $(D2 - D1) < Z$.

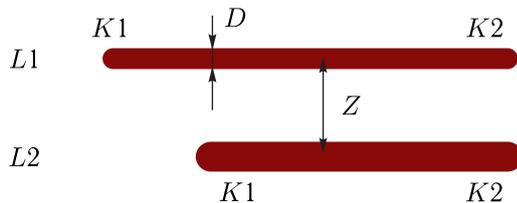


Рис. 5. Представление проводников в рамках систем CAD/CAM

В работе [5] рассматриваются три стратегии расширения, суть которых иллюстрирует рис. 6.

Первый способ, именуемый «центральной стратегией» расширения проводника, приведен на рис. 6, а.

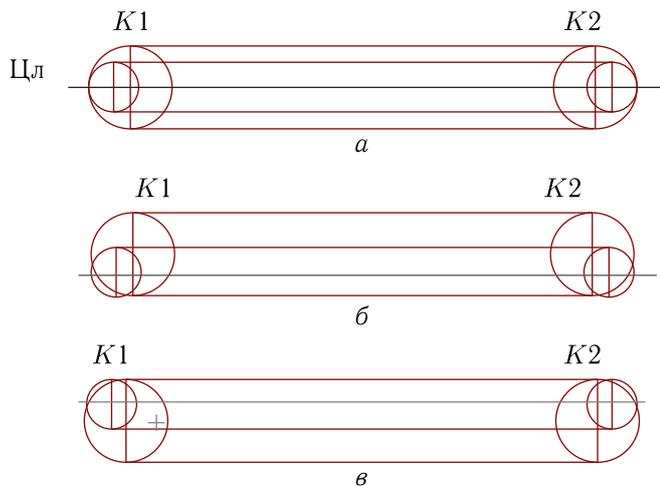


Рис. 6. а) «Центральная стратегия» расширения проводника; б) «левосторонняя стратегия» расширения проводника; в) «правосторонняя стратегия» расширения проводника

В этом варианте проводник расширится в обе стороны от центральной линии (Цл) проводника.

«Левосторонняя стратегия» приведена на рис. 6, б.

В этом варианте производится расширение проводника слева от центральной линии проводника.

Ориентация размещения (левосторонняя/правосторонняя) определяется направлением от $K1$ к $K2$.

«Правосторонняя стратегия» приведена на рис. 6, в.

Этот способ осуществляет расширение проводника справа от центральной линии проводника.

При решении задачи расширения проводников задействованы все ТК, структура данных которых приведена на рис. 3. Независимо от типа ТК, их геометрия описывается контурами (1). Так, модель проводника представляется в виде охватывающего контура (см. рис. 7), при этом его элементами являются: вектор № 1 с координатами $K1 = (x_1, (y_1 + D/2))$ и $K2 = (x_2, (y_1 + D/2))$; векторы № 2, № 3, № 4, № 5, интерполирующие окружность с центром (x_2, y_2) и диаметром D ; вектор № 6 с координатами $K1 = (x_2, (y_2 - D/2))$ и $K2 = (x_1, (y_2 - D/2))$; векторы № 7, № 8, № 9, № 10, интерполирующие окружность центром (x_1, y_1) и диаметром D .

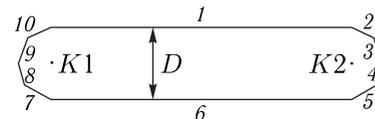


Рис. 7. Охватывающий контур для проводника

Естественно, что при размещении проводника под углом к осям координаты векторов пересчитываются в соответствии с этим углом.

Охватывающий контур ТК, описываемый как окружность, интерполируется вписанным восьмиугольником.

Введем следующие обозначения. Пусть $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ — массив всех ТК, присутствующих на ПП, а $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ — массив проводников заданной ширины, подлежащих расширению, причем $P \ni M$. Проводник p_i будем именовать «целью». Остальные ТК, расположение которых будет исследоваться на ВР, будем именовать «обработчиком». Перед формулированием алгоритма обработки опишем контуры, «цели» и «обработчика».

Охватывающий контур для ТК — «цели». Модель «цели» в рамках задачи расширения проводников и реализации «центральной стратегии» имеет вид, показанный на рис. 8. Как мы видим, эта модель отличается от модели на рис. 7 тем, что в качестве диаметра проводника используется

значение D_n , являющееся результатом работы алгоритма (будем считать, что $D_n = D \cdot 1,4$). Для реализации «левосторонней стратегии» модель смещается вверх от центральной линии (Цл) на расстояние $(D_n - D)/2$. Для «правосторонней стратегии» смещение осуществляется вниз.

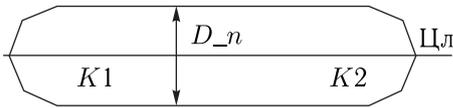


Рис. 8. Охватывающий контур для «цели» при реализации «центральной стратегии»

При этом длина модели M будет равняться

$$M = \sqrt{(x_2 - x_1) \cdot (x_2 - x_1) + (y_2 - y_1) \cdot (y_2 - y_1)} + D.$$

Охватывающий контур ТК проводника-«обработчика» с шириной D представляется в виде контура, охватывающего «трехслойный пирог», в центре которого размещен эквивалент проводника-«обработчика», а с краев — топология, охватываемая контуром, отстоящим от эквивалента на величину зазора Z (см. рис. 9).

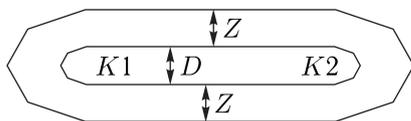


Рис. 9. Охватывающий контур для проводника-«обработчика»

Для обработки ТК, геометрия которых описывается окружностью, охватывающий контур представляет собой вписанный в окружность восьмиугольник, при этом диаметр окружности D равняется диаметру ТК плюс два размера зазора Z (см. рис. 10).

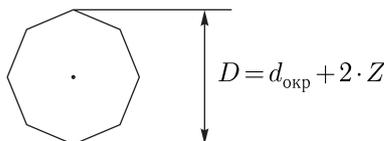


Рис. 10. Охватывающий контур для ТК «обработчика», имеющего форму окружности

Охватывающий контур для отрезка, входящего в множество отрезков, описывающих полигон или прямоугольную КП, представляет собой модель проводника с шириной, равной нулю (см. рис. 11).

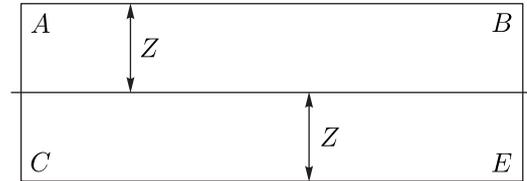


Рис. 11. Модель для отрезка, входящего в полигон

Прежде чем описывать алгоритм расширения проводников, рассмотрим механизм выполнения логической операции «вычитания» над ТК, модели которых приведены на рис. 8–11.

После проектирования ПП все ТК расположены друг от друга на расстоянии не менее чем величина зазора Z . При исследовании ВР моделей ТК, возникающих после расширения проводников, могут иметь место три ситуации:

- отсутствие взаимодействия между ТК (рис. 12, а);
- пересечение ТК (рис. 12, б);
- касание ТК (рис. 12, в).

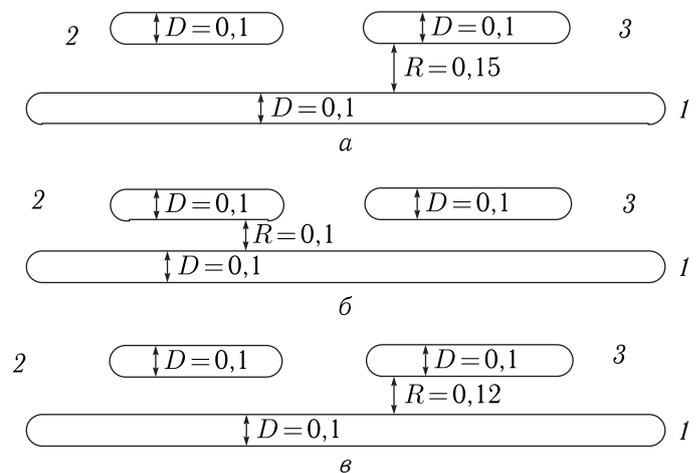


Рис. 12. Исходное представление ТК

Во всех вариантах проводник $N1$ является «целью», проводники $N2$, $N3$ — «обработчиками». Значение Z и ширина проводников равны 0,1 мм. Для всех вариантов расстояние между проводниками определяется значением R . Расширение произ-

водится до значения $D_n = 0,14$ мм. Несмотря на то, что в реальных расчетах ТК представлены в виде моделей, изображенных на рис. 8–11, для упрощения понимания алгоритма на рис. 12–14 изображения отрезков, интерполирующих «маску» в точках $K1$ и $K2$, будем представлять в виде дуг, а модели проводников-«обработчиков» — в виде прямоугольников.

Если указанные топологии представить в виде охватывающих контуров, мы получим результаты, показанные на рис. 13, *а, б, в*.

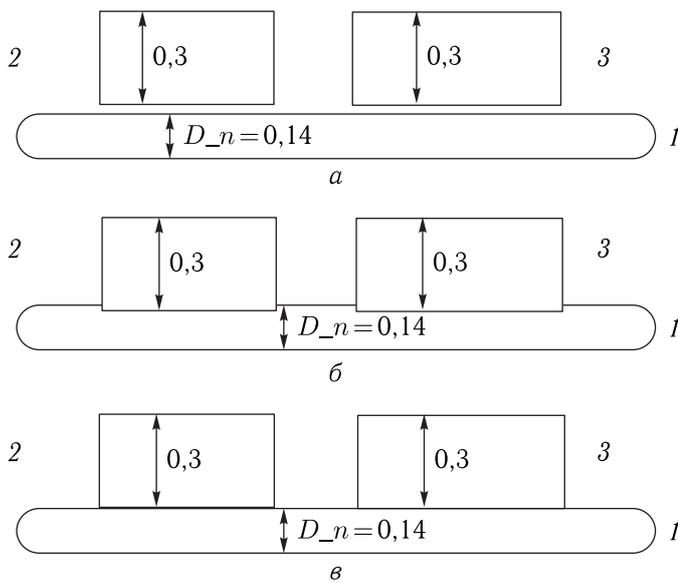


Рис. 13. *а)* Расстояние между «целью» и «обработчиками» 0,02 мм; *б)* «обработчик» заходит в «цель» на глубину 0,02 мм; *в)* «обработчик» касается «цели» на уровне 1 первого отрезка (см. рис. 7)

Результаты выполнения операции $p_1/m_2/m_3$ представлены на рис. 14, *а, б, в*.

На рис. 14, *а* проводник-«цель» не претерпел изменений, поскольку не было контактирования с другими ТК, и поэтому первый проводник расширен до нужного размера с $D_n = 0,14$ мм.

На рис. 14, *б* в результате выполнения операции $p_1/m_2/m_3$ отрезок $N1$ (см. рис. 7) в соответствии с семантикой операции преобразовался в девять отрезков и превратился в полигон.

Для реализации этого действия в модели формируется новая цепочка из девяти отрезков, которая включается в контур проводника. Это достигается переустановкой существующих указате-

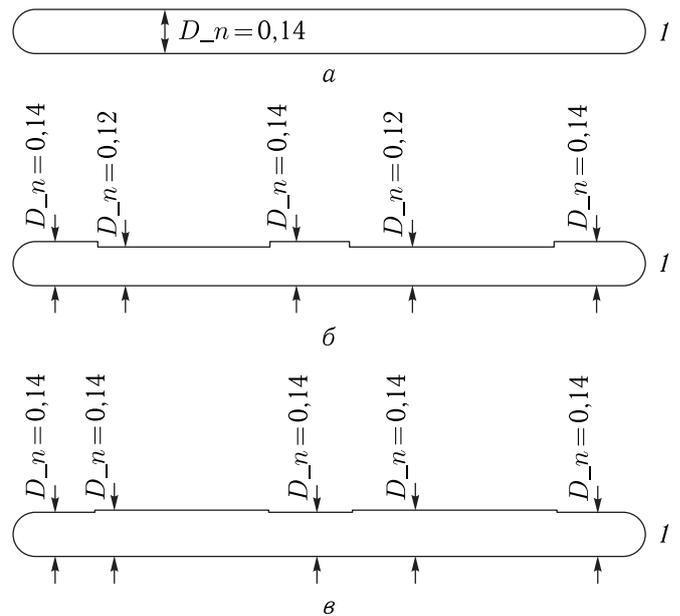


Рис. 14. Представление ТК после обработки

лей на вновь сформированные фрагменты топологии. После того, как проводник преобразовался в полигон, обработку можно считать завершённой, так как полигон является инструментом отображения топологии. Но возможен и другой вариант описания финальной топологии. Этот вариант заключается в следующем. Как видно из рис. 14, *б*, проводник $N1$ разбит на пять отрезков, каждый из которых имеет свою ширину, а именно три отрезка имеют ширину, равную 0,14 мм, и два отрезка — ширину 0,12 мм. Эти пять отрезков с параметрами, определяемыми конфигурацией полигона, и замещают проводник $N1$. Такая схема замещения была применена в программе [5]. Очевидно, что читатель вправе сам выбрать способ, который больше всего его устраивает: представление результата в виде полигона или в виде набора отрезков.

На рис. 14, *в* в результате выполнения операции $p_1/m_2/m_3$ отрезок $N1$ (см. рис. 7) в соответствии с семантикой операции преобразовался в пять отрезков, при этом все отрезки имеют одинаковую координату по оси Y . Далее возможно замещение отрезка $N1$ пятью отрезками либо проведение дополнительной проверки с целью его представления одним проводником.

Рассмотрим алгоритм расширения проводников, представленный на рис. 15.

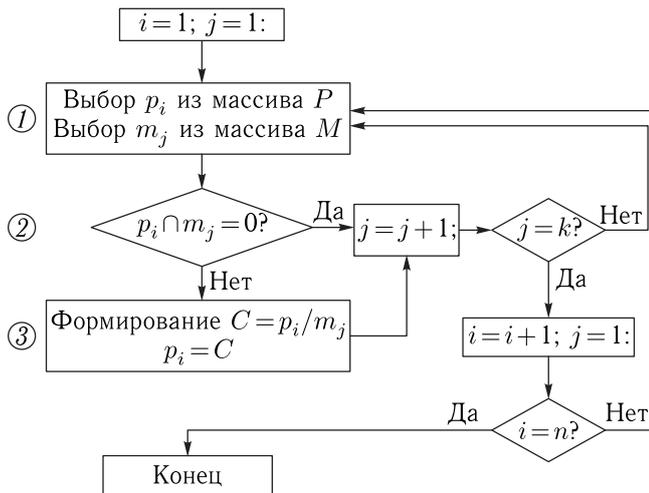


Рис. 15. Алгоритм расширения проводников

После инициализации индекса i , обеспечивающего сканирование по множеству P , и индекса j , обеспечивающего сканирование по массиву M , формируются модели проводника-«цели» p_i и ТК-«обработчика» m_j (см. блок 1 на рис. 15).

Затем исследуется ВР, которое реализуется посредством выполнения проверки $p_i \cap m_j = 0$, в результате чего определяется ВР ТК (см. блок 2 на рис. 15).

Если $p_i \cap m_j \neq 0$, то две ТК контактируют и в этом случае выполняются операции, представленные в 3-м блоке (см. рис. 15). При этом формируется ТК $C = p_i / m_j$, которая заменяет в множестве P компоненту p_i . Если ТК p_i и m_j не пересекаются, то увеличивается индекс j , что обеспечивает переход на следующий m_j и соответствующую проверку. Если выборка по P завершена, увеличивается i , что обеспечивает проверку для следующего проводника, подлежащего расширению. При достижении i значения n работа алгоритма завершается.

Другими словами, можно говорить, что работа алгоритма заключается в следующем: изначально все проводники-«цели» расширяются до финишного значения D_n , а затем ТК-«обработчики» посредством логической операции «вычитание» убирают лишнюю топологию — металлизацию из проводников-«цели».

Очевидно, что, применяя модели «цели» и «обработчика», можно проводить и контроль DRC, предусматривающий контроль соблюдения зазоров между ТК.

Компоновки ПП перед их выводом в поле фотошаблона

В работе [6] описывается ПО, предназначенное для компоновки ПП перед их выводом в поле фотопленки.

Согласно примеру, приведенному в [6], существует множество $M = (m_1, m_2, \dots, m_9, m_K, m_{ABCD})$, состоящее из девяти ПП, одного технологического компонента-купона, обозначенного буквой K , и прямоугольника $ABCD$, представляющего собой «поле ФШ», при этом m_K принудительно размещен в его левом верхнем углу (см. рис. 16).

Как видно из рис. 16, все ПП размещены в пределах прямоугольника $ABCD$, при этом все элементы M описываются как ТК типа КП (см. рис. 3, а) прямоугольной формы. Посредством ПО, реализующего некий эвристический алгоритм, произведено автоматическое размещение пяти ПП с номерами 1, 4, 8, 7, 9.

Очевидно, что эвристические алгоритмы не в состоянии обеспечить оптимальную компоновку плат. Поэтому предлагается набор инструментов, который бы в ручном режиме позволил улучшить результаты компоновки.

Для этих целей разработано ПО, именуемое «компоновщиком». При этом инструменты должны обеспечивать перемещение, повороты, удаление, ввод новых ПП, не нарушая заранее установленных норм компоновки.

Рассмотрим эти инструменты.

Перемещение/поворот ПП. Для перемещения/поворота ПП пользователю предлагаются следующие команды: сдвиг влево (Сд_Л), сдвиг вправо (Сд_П), сдвиг вверх (Сд_В), сдвиг вниз (Сд_Н), длинный сдвиг влево (Сд_ЛД), длинный сдвиг вправо (Сд_ПД), длинный сдвиг вверх (Сд_ВД), длинный сдвиг вниз (Сд_НД), поворот (Пв).

Итак, после автоматической компоновки мы имеем следующие ТК:

– множество размещенных ПП $S = (s_1, s_4, s_7, s_8, s_9, s_k, s_{ABCD})$, в число которых входит как купон, так и «поле ФШ» (прямоугольник $ABCD$);

– множество не размещенных ПП $P = (p_2, p_3, p_5, p_6)$.

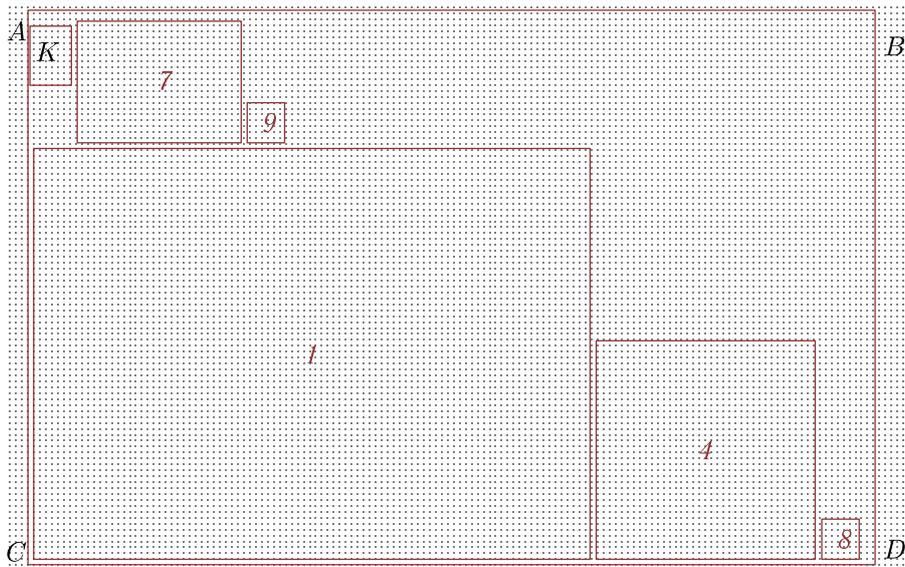


Рис. 16. Расположение ПП после автоматического размещения

Для перемещения ПП s_i необходимо выполнить действия в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 17.

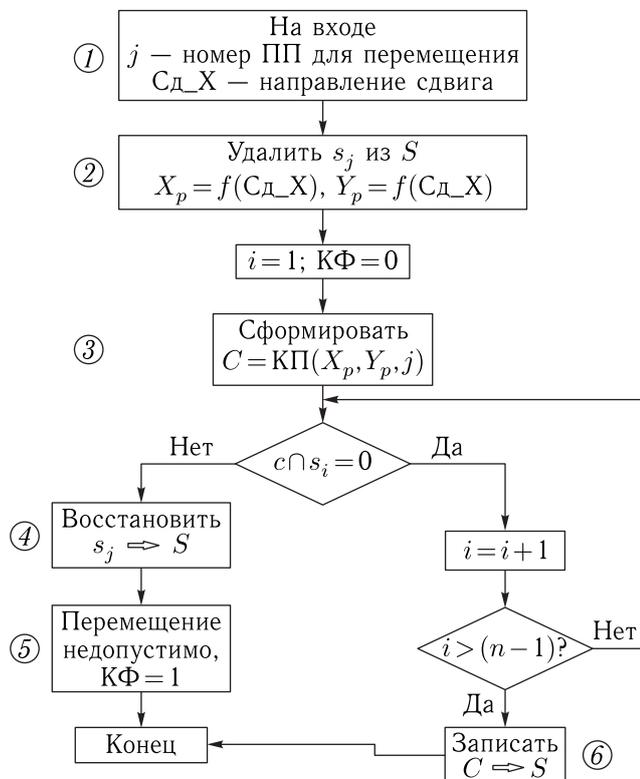


Рис. 17. Алгоритм сдвига ТК

На вход поступает номер j , который соответствует ПП, подлежащей перемещению, и направление сдвига $Сд_X$, где $X = Л/П/В/Н$.

Затем (см. блок 2 на рис. 17) из множества S изымается s_j , поскольку эта ПП подлежит сдвигу, а также рассчитывается точка привязки (X_p, Y_p) после сдвига. Изначально ПП s_j имеет точку привязки (X_n, Y_n) . Точка привязки (X_p, Y_p) вычисляется следующим образом:

- для $Сд_П$ $X_p = X_n + diskr$, $Y_p = Y_n$, при этом $diskr$ — величина смещения;
- для $Сд_Л$ $X_p = X_n - diskr$, $Y_p = Y_n$;
- для $Сд_В$ $X_p = X_n$, $Y_p = Y_n + diskr$;
- для $Сд_Н$ $X_p = X_n$, $Y_p = Y_n - diskr$.

Далее иницируются индекс сканирования по $S_i = 0$ и признак конфликта $КФ = 0$, являющиеся одним из результатов работы алгоритма.

После этого (см. блок 3 на рис. 17) рассчитывается ТК $C = КП(X_p, Y_p, j)$, являющаяся образцом ПП s_j с точкой привязки (X_p, Y_p) и параметрами s_j .

Затем исследуются ВР ТыК C и s_i посредством выполнения операции $C \cap s_i \neq 0$.

Если имеет место контактирование C с какой-либо размещенной ПП, купоном или «полем ФШ», то старое значение s_j восстановится в S (см. блок 4 на рис. 17) и $КФ = 1$ (см. блок 5 на рис. 17), работа программы завершена.

Если контактирования не было, то вместо s_j в S записывается C (см. блок 6 на рис. 17), а КФ при этом равен 0. При этом s_j визуализируется в точке (X_p, Y_p) . Работа алгоритма завершена.

Длинный сдвиг отличается от просто сдвига тем, что движение ПП осуществляется до тех пор, пока плата не «наткнется» на какое-либо препятствие, в качестве которого может выступать другая ПП, купон или «поле ФШ». Алгоритм длинного сдвига приведен на рис. 18. Обработка поворота ПП идентична обработке сдвига и проводится по той же схеме, при этом формирование C производится заменой габаритов ПП GX и GY следующим образом: $RAB = GX$; $GX = GY$; $GY = RAB$.

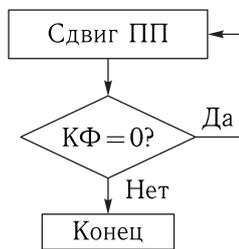


Рис. 18. Алгоритм длинного сдвига

Удаление ПП осуществляется программными средствами и не требует механизмов исследования ВР ТК.

Размещение ТК в «поле ФШ»

Размещение геометрических фигур на некоторой площади является типовой задачей. Необходимость в решении этой задачи возникает при проектировании ПП, их изготовлении, при раскрое материалов [7] и т. д.

Итак, имеется множество размещенных ПП $S = (s_1, s_4, s_7, s_8, s_9, s_k, s_{ABCD})$ и (см. рис. 16) множество неразмещенных ПП $P = (p_2, p_3, p_5, p_6)$. Пусть $\{X_{\min}, X_{\max}, Y_{\min}, Y_{\max}\}$ — минимаксные координаты прямоугольника $ABCD$. Для уплотнения компоновки встает задача о проверке возможности дополнительного ввода в «поле ФШ» платы из множества P . Для этого в «поле ФШ» необходимо определить точку привязки для платы p_i , при этом она не должна конфликтовать с ТК из множества S .

Эта задача решается с помощью алгоритма, приведенного на рис. 19.

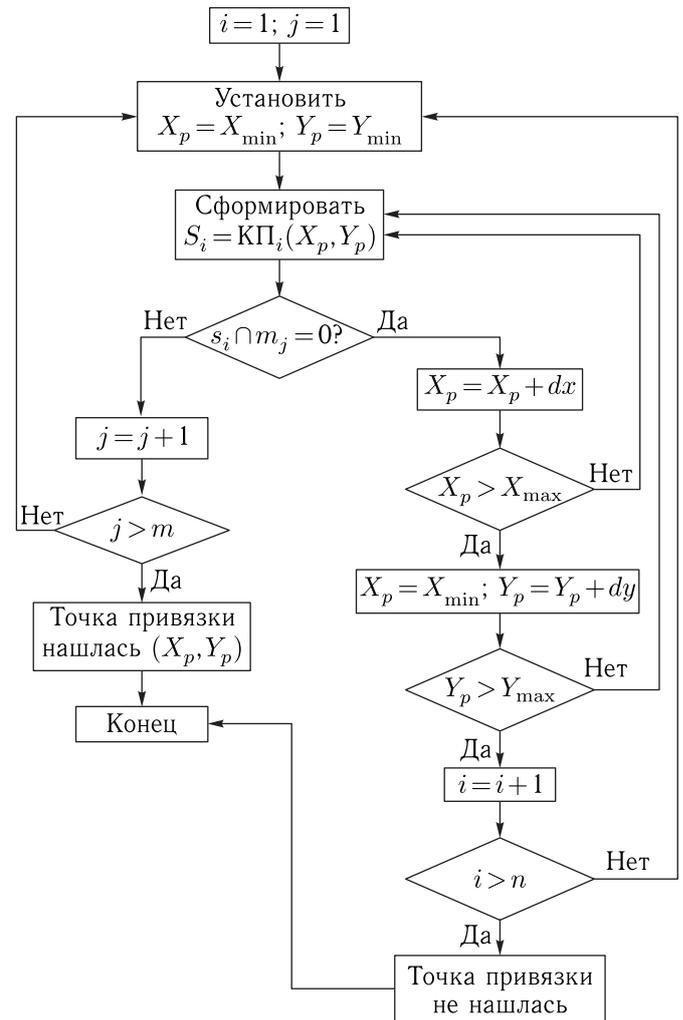


Рис. 19. Алгоритм поиска точки привязки ПП

Изначально устанавливаются i — индекс сканирования по множеству S , j — индекс сканирования по множеству P : $i = 1$; $j = 1$. Сканирование по j обеспечивает последовательность проверок из P .

Программа генерирует последовательность точек (X_p, Y_p) , которые возрастают по оси X от значения X_{\min} до X_{\max} посредством прибавления к X_p смещения dx . При достижении X_{\max} координата Y_p увеличивается на смещение dy , а $X_p = X_{\min}$. При достижении Y_p значения Y_{\max} происходит переход к проверке следующей платы из P .

Таким образом, точка привязки осуществляет движение, подобное движению телевизионного раstra. Для каждой точки (X_p, Y_p) формируется

ТК $C = \text{КП}(X_p, Y_p, j)$, которая является образом p_j в точке привязки (X_p, Y_p) . После чего исследуются ВР с размещенными ПП и купоном посредством выполнения операции $C \cap s_i \neq 0$. Если находится такая (X_p, Y_p) , у которой бы результат операции $C \cap s_j = 0$ для всех ПП, находящихся в «поле ФШ», то эта точка является точкой привязки p_j .

При реализации алгоритма необходимо правильно выбрать значение dx и dy . При их малых значениях можно получить значительное время обработки. Если же dx и dy будут велики, то это может привести к уменьшению вероятности нахождения свободного места для установки ПП. В [6] приведены результаты поиска места для ПП из множества P .

Подготовка «поля ФШ» перед размещением на нем изображения ПП

Процесс подготовки информации для изготовления ФШ описан в работе [8] и осуществляется следующим образом. Из заранее сформированного ряда заготовок по некоторым правилам выбирается одна из них, например заготовка, представленная на рис. 20.

Как правило, выбор определяется технологическими требованиями, характером выводимой информации, порядковым номером слоя в ПП и т. д.

Такая заготовка представляет собой «поле ФШ», на котором размещается множество ТК $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$. Тип M — полигон, который описывает контур, имеющий форму клина.

В программе «компоновщик» осуществлено размещение ПП (см. рис. 16), представленное в виде множества ПП: $S = (s_1, s_4, s_7, s_8, s_9, s_k, s_{ABCD})$.

Для этого варианта размещения проведена подготовка информации для изготовления ФШ (см. рис. 21). Как видно из рис. 21, в тех местах «поля ФШ», где располагаются ПП, должно произойти освобождение от изображений, принадлежащих заготовке. В дальнейшем на освобожденных местах разместятся ПП. В системе САМ-350 [2] существуют механизмы использования композитных слоев, которые позволяют решить эту задачу. В качестве альтернативного способа можно применить метод исследования ВР ТК. Для решения этой задачи необходимо выполнить следующие действия:

$$\begin{aligned} c_1 &= m_1/p_1/\dots/p_m \\ c_2 &= m_2/p_1/\dots/p_m \\ &\dots\dots\dots \\ c_n &= m_n/p_1/\dots/p_m. \end{aligned}$$

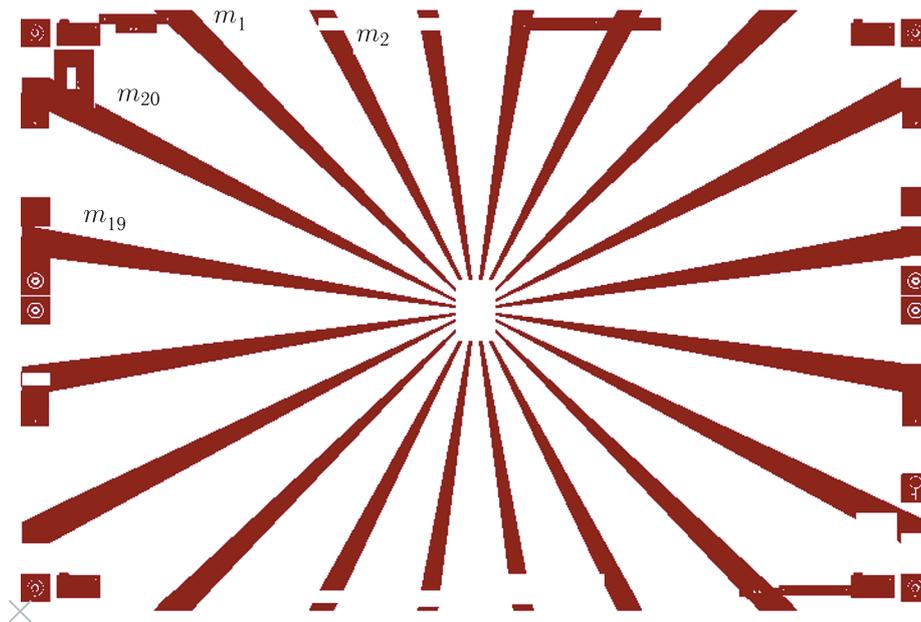


Рис. 20. Один из вариантов заготовки для формирования ФШ

Результат этих действий $C = c_1 \cup c_2 \cup \dots \cup c_n$ представлен на рис. 21.

И далее в это обработанное «поле ФШ» загружаются изображения ПП (см. рис. 22).

Приведенные примеры, реализованные в виде программ, прошли опытную эксплуатацию, подтвер-

ждающую корректность результата, при этом во всех вариантах прослеживается единый подход: задача описывается некоторой последовательностью логических операций, выполняемых над ТК посредством методов [4], реализуется заложенная последовательность, обеспечивая выполнение задачи.

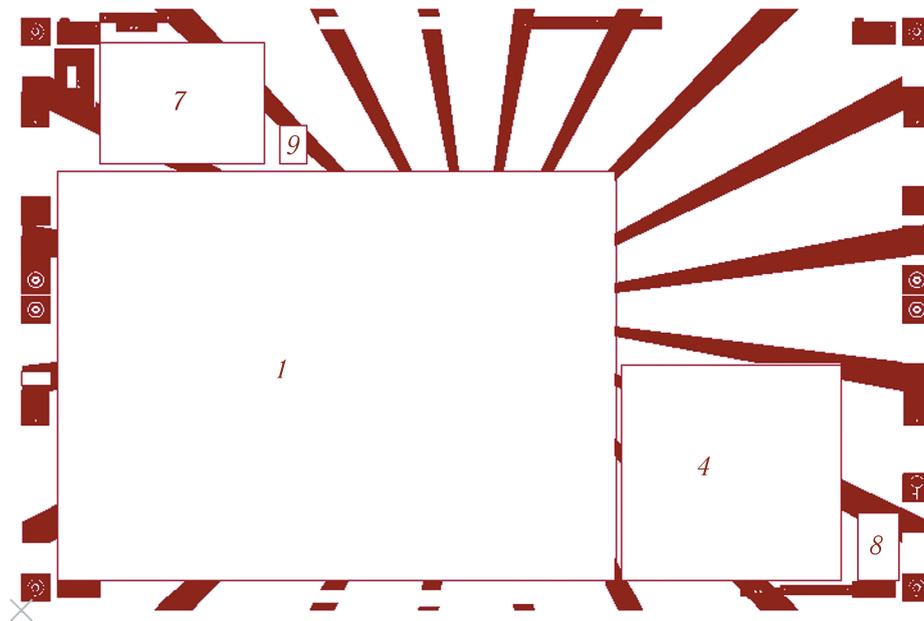


Рис. 21. Результат подготовки информации

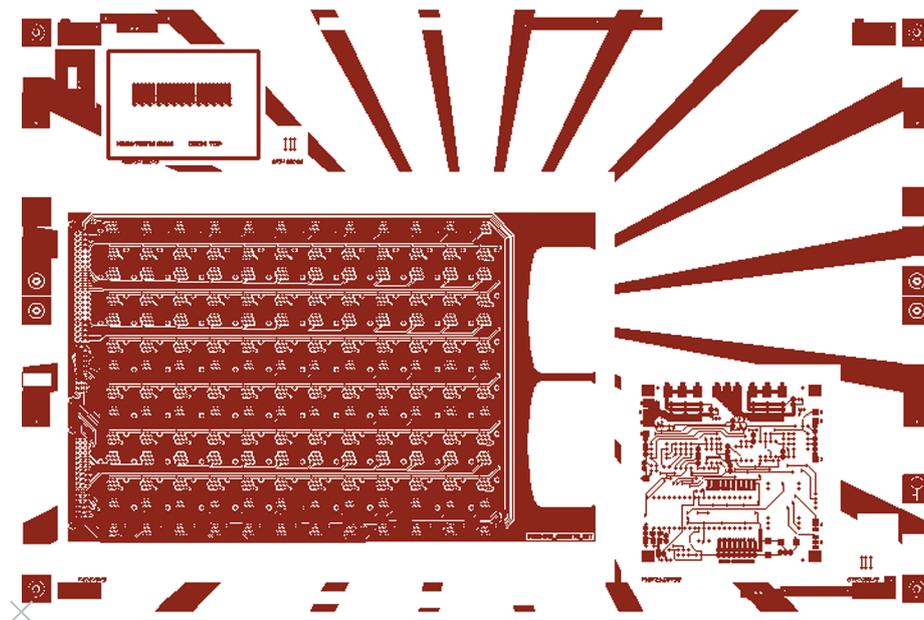


Рис. 22. «Поле ФШ» с размещенными ФС

Таким образом, можно констатировать, что предлагаемые методы в состоянии решать задачи, связанные обработкой топологий.

Список литературы

1. <https://www.altium.com> (Дата обращения 12.05.2020).
2. www.eurointech.ru/learn_cam350
3. Frontline: сайт. URL: www.frontline-pcb.com (Дата обращения 12.05.2020).
4. *Архангельский А.Н.* Методы обработки топологических компонентов при проектировании и изготовлении электронной аппаратуры // Информационные технологии, 2017, № 10.
5. *Архангельский А.Н., Летфуллин И.Р., Трофименко Р.В.* Оптимизация топологии печатных плат при их изготовлении // Технологии в электронной промышленности, 2018, № 7. С. 34–36.
6. *Архангельский А.Н., Летфуллин И.Р., Трофименко Р.В.* Методы компоновки печатных плат в поле заготовки перед изготовлении фотошаблонов // Технологии в электронной промышленности, 2019, № 2. С. 27–31.
7. *Мухачева Э.А.* Обзор и перспективы развития комбинаторных методов решения задач раскроя и упаковки // Материалы конференции «Дискретный анализ и исследование операций». Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 2002. С. 80–87.
8. *Архангельский А.Н., Летфуллин И.Р., Трофименко Р.В.* Система подготовки данных на разногабаритные печатные платы // Технологии в электронной промышленности, 2019, № 1. С. 25–29.