

Ижевск 1998

на правах рукописи

Егоров Станислав Феликсович

УДК 621.391:681.142

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
АЛГОРИТМОВ СТРУКТУРНОГО
ОПИСАНИЯ И АНАЛИЗА ТОПОЛОГИИ
ИЗДЕЛИЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ В
СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ**

специальность 05.13.14 - Системы обработки информации и управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Ижевск 1998

Работа выполнена в Ижевском государственном техническом университете, г.Ижевск

Научный руководитель — кандидат технических наук,
доцент Р.М. Гафаров

Официальные оппоненты — доктор технических наук,
профессор В.Н. Кучуганов

кандидат технических наук
В.А. Широков

Ведущая организация — Физико-технический институт
УрО РАН г.Ижевск

Защита состоится "15" декабря 1998 г. в 14.00 часов
на заседании диссертационного совета К 064.35.02

в Ижевском государственном техническом университете
по адресу: 426069, г.Ижевск, ул.Студенческая, 7, ИжГТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИжГТУ.

Автореферат разослан "13" ноября 1998 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



В.Н.Сяктерев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Интенсификация и автоматизация процессов производства изделий радиоэлектроники (РЭА) требует совершенствования обработки информации в системах управления и контроля. Технология печатных плат (ПП), обеспечивающая изготовление надёжных проводниковых соединений, является дешёвой, простой и гибкой. Основным сдерживающим фактором производства является большое число неавтоматизированных операций оптического контроля (от 20 до 80 % трудозатрат). До сих пор на многих предприятиях визуальный контроль качества топологии ПП осуществляется человеком. Основные недостатки использования зрительного анализатора человека на контрольных операциях в производственном цикле — малая производительность и быстрая утомляемость, низкая надёжность и высокая трудоёмкость. Так достоверность проверки составляет в среднем не более 65 %, а при существующей тенденции к изготовлению всё более тонких и всё более густо расположенных проводников достоверность такого контроля должна падать.

В связи с этим является перспективной разработка систем машинического зрения (СТЗ) для замены зрительного анализатора человека или, по крайней мере, освобождение его от однообразной, одной и утомительной работы. Одно из основных достоинств, которые открывают СТЗ, заключается в реализации практически 100 % контроля, что позволяет строить системы автоматического контроля качества продукции всего производственного цикла. Потребность в автоматическом визуальном контроле постоянно увеличивается и растёт необходимость применения соответствующих анализаторов, выдающих требуемым быстродействием и способностью контролировать объекты с изменяющимися сложными структурами. В настоящее время наблюдается рост возможностей стандартных средств числительной техники одновременно с падением цен на них, что открывает широкие возможности для внедрения СТЗ и для их дальнейшего совершенствования.

Широкий круг задач, таких как измерение ширины проводников и определение координат контактных площадок при контроле печатных плат и фотошаблонов (ФС), сводится к выделению объектов в пространстве с помощью СТЗ и их описанию — получению совокупности количественных и качественных характеристик, образующих набор признаков, который в дальнейшем используется для распознавания объектов и их классификации; также при описании происходит значительное сжатие информации.

Основные подходы к решению задачи описания изображения ПП и ФС для их дальнейшего анализа и контроля на дефекты

подразделяются на растровый, контурный и скелетный. Исходные изображения обладают значительной информационной емкостью, получение описания приводит к значительному сокращению объема информации. Точность описания во многом определяется выбором оптимальных методов фильтрации и бинаризации. Существующие методы описания и аппроксимации при обеспечении заданной точности и быстродействия обладают высокой сложностью реализации, следовательно, высокой стоимостью. После получения описания определяются дефектные места топологии сравнением с эталоном или по проектным нормам.

Растровое описание, несмотря на высокую точность представления, имеет ряд недостатков, ограничивающих его применение: низкое быстродействие, высокую ресурсоемкость, недостаточную достоверность распознавания дефектов. Наиболее распространено контурное описание, которое предполагает описание границ объектов бинарных изображений и их аппроксимацию. Контурное описание достаточно просто реализуется, но требует сложных алгоритмов для его анализа.

При скелетном же описании вместо границ изображения выделяется и аппроксимируется центральная осевая линия. Анализ такого структурного описания требует значительно меньших вычислительных затрат, однако существующие алгоритмы выделения скелета не обладают достаточным быстродействием и эффективностью, что ограничивает их практическое применение в СТЗ.

Таким образом, актуальной является разработка структурных методов описания объектов, обеспечивающих высокую точность и быстродействие, и допускающих простую реализацию. В данной работе разрабатываются и исследуются алгоритмы обработки информации в СТЗ для контроля топологических рисунков ПП и ФШ, основанные на структурно-измерительном описании топологии на базе выделения скелета изображения.

Целью работы является разработка и исследование быстродействующих и простых в реализации методов и алгоритмов описания и контроля топологии изделий РЭА скоростными контролирующими системами технического зрения для выявления дефектов топологии и обеспечения требуемой достоверности распознавания и низкой стоимости.

Для достижения указанной цели ставятся следующие задачи.

1. Разработка новой модели представления топологии на базе выделения скелета изображения с сохранением необходимых для контроля метрических характеристик объектов и сокращающей избыточность видеoinформации ещё на ранней стадии обработки.

Разработка модели представления дефектов для всех классов топологии и размерностей дефектов на базе скелетного описания.

Разработка эффективного однопроходного построительно-сканирующего алгоритма реализующего скелетное описание в режиме реального времени.

Разработка эффективных алгоритмов обработки и анализа скелетного описания топологии с целью распознавания дефектов.

Разработка аппаратных и программных средств для реализации алгоритмов выделения и анализа скелетного описания топологии.

Оценка временной сложности алгоритмов и программ описания изображения и распознавания дефектов для обеспечения работы в режиме реального времени на общедоступных вычислительных средствах низкой стоимости.

Проверка достоверности результатов распознавания дефектов для определения её соответствия заданным критериям оценки СТЗ оптического контроля.

Испытание разработанных методик и средств описания и анализа изображений.

Методика исследований основана на использовании теории множеств, математической логики, теории графов, теории автоматов, теории распознавания образов.

В качестве предмета исследования применяются как реальные, так искусственные изображения топологии печатных плат.

Научная новизна. В результате проведённых исследований разработан метод структурно-измерительного распознавания для тоmatизации скоростного оптического контроля дефектов топологии изделий радиоэлектроники, при этом получены следующие новые научные результаты, выносимые на защиту:

Модель представления изображения топологии в виде графов связности характерных мест скелета рисунка и фона с сохранением необходимых для контроля измерительных характеристик объектов и сокращающей избыточность информации.

Эффективный сканирующий алгоритм выделения скелета изображения и представления его в виде графа связности в режиме реального времени.

Методика анализа и сравнения топологии на основе скелетного описания с целью идентификации дефектов.

Практическая ценность. Разработанные модели и алгоритмы описания и анализа изображений топологии и дефектов положены в основу функционирования эффективных аппаратных и программных средств СТЗ контроля топологии изделий радиоэлектроники, способной обеспечить требуемую достоверность распознавания всех элементов топологии типа проводник, контактная площадка, отверстие и

недопустимых дефектов как ПП, так и ФШ. Кроме того, разработаны методы и средства могут быть использованы в устройствах оучствления роботов, программах анализа чертёжно-графической и картографической информации.

Реализация в промышленности. Результаты работы использованы в автоматизированной системе визуального контроля ФШ и ПП “Микрон”, внедренной на различных предприятиях. Описываемый алгоритм скелетизации лег в основу разработанной программы векторизации чертёжной и картографической информации VEGA-express, используемой на предприятиях г.Ижевска.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на 5 конференциях и семинарах.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 1 работ, аппаратная часть находится на стадии патентования.

Структура и объем диссертации. Работа изложена на 12 страницах основного текста, иллюстрируется 38 рисунками, 1 таблицами и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 135 наименований и 3 приложений на 18 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу технической проблемы автоматизации контроля топологии в процессе производства печатных плат, дан обзор существующих методов контроля, методов описания топологии и алгоритмов выделения скелета изображения. Сформулированы цель и задачи исследований.

Отмечается, что контроль ФШ и ПП всё еще выполняет человек-контролёр, не обеспечивающим требуемую достоверность распознавания дефектов. Выделены основные дефекты топологии (табл. 1): качественные (разрывы и закоротки) и количественные (сужения, сближения, вкрапления, “дыры”), для идентификации которых необходимо провести сравнение их размеров с допуском. Анализ методов и систем контроля на базе СТЗ выявил многообразие существующих подходов к описанию и анализу топологии ФШ и ПП как на основе сравнения описания топологии с эталонной, так и с сравнением с проектными нормами. Сделан вывод о необходимости дальнейшего совершенствования автоматизации операции контроля топологии ПП средствами СТЗ и сформулированы основные требования: высокая достоверность распознавания дефектов, гибкость и перенастраиваемость системы контроля, работа в масштабе реального времени, низкая стоимость.

Основные традиционные методы описания топологии ПП и ФШ и распознавания дефектов, реализуемые в СТЗ, — это растровое или структурное описание изображения и последующее его сравнение с полным или с проектными нормами. При этом может использоваться полное описание топологии или описание только её характерных мест.

При полном описании анализируется весь рисунок топологии на наличие рассогласования с эталоном или на присутствие недопустимых конфигураций, нарушающих проектные нормы. Такой подход требует полного совмещения изображений, но в условиях производства из-за существующих допусков на параметры топологии ПП добиться этого не удается. Эти же причины осложняют и выявление недопустимых конфигураций, многие из которых в данных условиях не являются фактами. Подобные трудности в конечном счёте сказываются на снижении достоверности распознавания дефектов.

Структурное описание предполагает выделение на изображении топологии торцов проводников, пересечений, а также мест допустимого сужения или сближения проводников, что позволяет полностью описать все дефекты. Такой метод можно назвать структурно-измерительным и подобное описание получается, например, путём выделения скелета изображения с сохранением информации о фактической ширине рисунка. Характерные места можно выделить и по контуру изображения, но структурные признаки по нему выделяются сложнее и с меньшей достоверностью. Таким образом, задача выделения характерных мест на топологии достаточно сложна, а проблема выделения скелета изображения приемлемого качества с минимумом затрат, необходимых для режима реального времени, до сих пор не решена.

Далее рассматриваются существующие методы выделения скелета прямого растрового изображения. Скелет — это множество точек изображения равно и минимально удалённых от ближайших точек границы (контура) рисунка. Математически это множество центров всех окружностей в изображении. Получить скелет можно последовательным удалением однократных контурных точек, но итерационный алгоритм требует большого количества проходов по изображению равно половине максимальной ширины объектов изображения (в пикселах), т.е. требует больших ресурсов и отличается высоким быстродействием. Все попытки ускорить алгоритм выделения скелета приводят к снижению качества получаемого скелета, что затрудняет выделение на нём характерных точек. Алгоритмы с ограниченным количеством проходов по изображению либо сложны и неформализованы, например, алгоритмы вписывания фигур (квадратов, кругов, трапеций), либо генерируют за три прохода двухточечный и срывами скелет изображения, например, основанные на функции расстояния; для улучшения качества скелета необходимы дополнительные проходы.

Таким образом формулируется цель исследования: требуется разработать быстрые и эффективные методы выделения характерных мест топологии на базе скелетного описания и распознавания дефектов для систем контроля топологии ФШ и ПП.

Во второй главе вводится графовая скелетная модель представления топологии и дефектов, исследуется поведение алгоритма вписывания квадратов на различных изображениях, выделяют основные этапы выделения скелета топологии и получения графоописания.

Предлагается хранить скелет топологии и фона, сохраняющий каждой точке информацию о текущей ширине изображения, в виде плоского неориентированного конечного графа G . Вершинами (узлами) такого графа ($a \in G$) являются характерные точки скелета — точки с числом соседних не равным двум или описывающие ширину мены допуска (признак “малый размер”) — и характеризуются координатами на плоскости x и y , шириной рисунка s в данной точке, типом t (фон/1-рисунок топологии), $p(a)$ — локальной степенью — количеством инцидентных вершине a рёбер. Рёбрами графа служат топологические связи между характерными точками скелета. Кроме этого вводятся $d(a,b)$ — расстояние на плоскости между вершинами a и b , $m(a,b)$ определяет существование маршрута из вершины a в b .

Полученный граф состоит из непересекающихся подграфов топологии G_T ($\forall a: G_T(t(a)=1$) и подграфа фона G_Φ ($\forall a: G_\Phi(t(a)=0$):



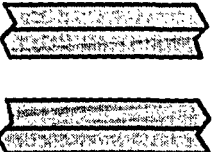
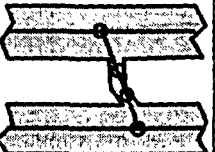
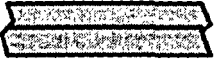



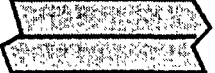




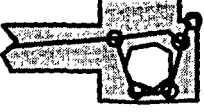
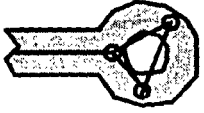
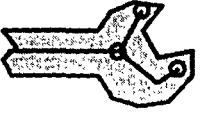
$$G = G_T \cup G_\Phi \quad (G_T \cap G_\Phi = \emptyset).$$

Каждый из дефектов (табл. 1) в рамках скелетной графовой модели имеет чёткое структурное представление в терминах графа: узлов определёнными степенями и связями между ними. При контроле сравнением с эталоном дефекты выступают как лишние элементы графоописания, а при контроле по проектным нормам каждый из видов дефектов характеризуется ещё и узлами с “малыми размерами” (т.е. размерами менее допуска на минимальное сужение/сближение проводников топологии D_{\min}), что и позволяет их независимо идентифицировать. Некоторые элементы описания могут носить вероятностный характер P :

- 1) разрыв: $(\exists a, b: G_T)(\exists c: G_\Phi: P \neq 0) [p(a)=1 \ \& \ p(b)=1 \ \& \ \neg m(a,b) \ \& \ s(c) < D_{\min} \ \& \ d(a,c) < D_{\min}]$
- существуют узлы графа топологии a и b степени $=1$ и не имеющие связывающего их маршрута, а также возможен (с вероятностью $P \neq 0$) узел c с графа фона с признаком “малый размер” и находящийся на изображении между a и b ;
- 2) закоротка $(\exists a, b: G_T)(\exists c: G_T: P \neq 0) [p(a) \geq 3 \ \& \ p(b) \geq 3 \ \& \ m(a,b) \ \& \ p(c)=2 \ \& \ s(c) < D_{\min} \ \& \ c \in m(a,b)]$

Таблица 1

Примеры дефектов топологии

Тип дефекта	Описание без дефектов	Описание дефектов	Примечания
разрыв проводника			Лишние два узла степени один и по фону узлы "малый размер"
перемычка сжду проводниками короткое замыкание			Лишние два связных узла степени три и узлы "малый размер"
недопустимое поглощение проводника, прокол			На скелете лишние узлы степени два с признаком "малый размер"
недопустимое слияние проводников, перекрест			Лишние узлы степени три и один (отросток) и по фону узлы "малый размер"
заковина в проводнике, "дыра", затрав			Лишние два двух-связных узла степени три (цикл) и по фону узлы "малый размер"
закрапление на линии, лишний элемент, затрав			Лишние два связных узла степени один и узлы "малый размер" (в т.ч. и по фону)
нарушение плотности контактной подкладки П и ФШ			Лишние два связных узла степени три и один (отросток) и узлы "малый размер"; нарушение "4" конфигурации
отщепление верстей			Лишние два узла степени один, нет цикла на графе скелета

- 3) сужение $(\exists a:G_T) [s(a) < D_{\text{MIN}}]$
- существует узел графа топологии a с признаком “малый размер”
- 4) сближение $(\exists a:G_\Phi) [s(a) < D_{\text{MIN}}]$
- 5) “дыра” $(\exists a, b:G_T) (\exists c:G_T: P_1 \neq 0) (\exists f, g:G_\Phi: P_2 \neq 0) [p(a) \geq 3 \ \& \ p(b) \ \& \ m_1(a, b) \ \& \ m_2(a, b) \ \& \ s(c) < D_{\text{MIN}} \ \& \ c \in m(a, b) \ \& \ s(f) < D_{\text{MIN}} \ \& \ s(g) < D_{\text{MIN}}]$
- существуют узлы графа топологии a и b степени ≥ 3 и имеющие d связывающих их маршрута (m_1 и m_2), а также возможны (с вероятностями $P_1, P_2 \neq 0$) узел c графа топологии находящийся на маршруте от a до b и узлы f и g с признаками “малый размер”;
- 6) вкрапление $(\exists a, b:G_T) (\exists c:G_\Phi: P \neq 0) [p(a) = 1 \ \& \ p(b) = 1 \ \& \ m(a, b) \ \& \ s(a) < D_{\text{MIN}}: P_1 \neq 0 \ \& \ s(b) < D_{\text{MIN}}: P_2 \neq 0 \ \& \ s(c) < D_{\text{MIN}} \ \& \ d(a, c) < D_{\text{MIN}}]$
- 7) дефекты контактных площадок (КП):
 а) нарушение целостности (для ПП) $(\exists a:G_T) (\exists b, c:G_T: P \neq 0) [p(a) \geq 3 \ \& \ m(a, a) \ \& \ p(b) \geq 3 \ \& \ b \in m(a, a) \ \& \ s(c) < D_{\text{MIN}} \ \& \ c \in m(a, a)]$
- на эталонном описании КП ПП $(\exists a:G_T) [p(a) \geq 3 \ \& \ m(a, a)]$ - циклы возможны узлы степени ≥ 3 или с признаком “малый размер”;
 б) нарушение целостности (для ФШ) - на эталонном описании: $(\exists a:G_T) (\exists e, f, g:G_T) [p(a) = 4 \ \& \ p(e) = 1 \ \& \ m(a, e) \ \& \ p(f) = 1 \ \& \ m(a, f) \ \& \ p(g) = 1 \ \& \ m(a, g)]$ - крестообразном участке графоописания, когда центральный узел a степени $= 4$ связан маршрутами с тремя узлами e, f, g степени $= 1$, - возникают искажения или дополнения:
 $(\exists b:G_T) [p(a) \neq 4 \ \& \ p(b) = 3 \ \& \ (b \in m(a, e) \vee b \in m(a, f) \vee b \in m(a, g))]$
- на описании появляется узел b , искажающий “+”-образную конфигурацию в “х”-образную;
 в) смещение отверстия $(\exists a, b:G_T) [p(a) = 1 \ \& \ p(b) = 1 \ \& \ m(a, b)]$
- существуют узлы графа топологии a и b степени $= 1$ и связанные маршрутом, тогда как на эталоне на этом месте присутствует другое описание: $(\exists a:G_T) [p(a) \geq 3 \ \& \ m(a, a)]$ - цикл

Предложенная структурно-измерительная модель представлена топологии ФШ и ПП и методы её анализа отличаются простотой представления и универсальностью использования, т.е. возможность проводить контроль как сравнением с эталоном, так и по проектным нормам.

Алгоритм однопроводного выделения скелета бинарно изображенного базируется на предложенной к.т.н. Р.М.Гафаровым идее вписывания в изображение квадратов, получаемых использованием функции расстояния. Центры этих вписанных квадратов и образуют множество скелетных точек изображения.

Далее рассматриваются примеры вписывания квадратов в некоторые фигуры: прямоугольники, круги, контактные площадки, фрагменты топологии. По ним формулируются основные этапы обработки изображения для получения скелета в рамках одного прохода по изображению:

- 1) вписывание квадратов, центры вписанных квадратов образуют множество скелетных точек;
- 2) связывание вписанных квадратов, когда ближайшие вписанные квадраты соединяются для обеспечения их связности; центры связных вписанных квадратов соединяются прямой для непрерывности скелетной линии;
- 3) фильтрация шумовых ветвей, скелетное описание отличается высокой чувствительностью к любому искривлению контура изображения, поэтому проводить удаление шумовых скелетных ветвей необходимо на ранних этапах обработки;
- 4) графоописание скелета, получаемый скелет топологии и фона изображения представляется в виде графа связности характерных точек (мест) скелета.

Вписывание квадратов осуществляется путём анализа бинарного изображения окном 2×2 (рис. 1) слева направо и сверху вниз. При этом в точке **d** окна вычисляется размер **S** очередного вписываемого квадрата как минимального расстояния от левой и верхней границы объекта по формуле:

$$S_{i,j} = 1 + \text{MIN}(S_{i,j-1}; S_{i-1,j}; S_{i-1,j-1}),$$

в точке **b** проверяется условие вписанности:

$$S_{i,j}\text{-вписан} == (S_{i,j} \geq S_{i,j+1}) \& (S_{i,j} \geq S_{i+1,j}) \& (S_{i,j} \geq S_{i+1,j+1})$$

На рис. 2 представлен пример вписывания квадратов в прямоугольник, их центры образуют скелет, рядом приведён олученный и математический скелеты прямоугольника.

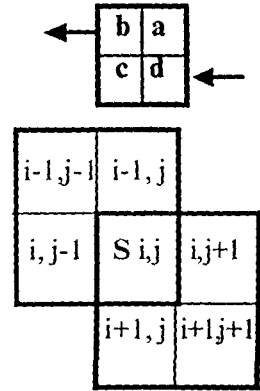


Рис. 1

```

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 2 2 2 2 2 2 2 2 2
1 2 3 3 3 3 3 3 3 3
1 2 3 4 4 4 4 4 4 4
1 2 3 4 5 5 5 5 5 5
1 2 3 4 5 6 6 6 6 6
1 2 3 4 5 6 7 7 7 7

```

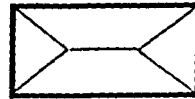
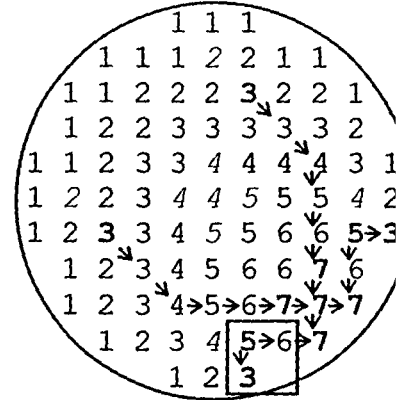


Рис. 2. Вписанные квадраты прямоугольника

Связывание соседних вписанных квадратов осуществляется за счёт введения понятия ухода из каждого вписанного квадрата. Уход — это априорное предположение о следующем вписанном квадрате, т.е. находясь в точке *b* выбирается максимальный по размеру квадрат *a*, *c* или *d*, который и помечается как имеющий приход (понятие обратное уходу), такой квадрат называется добавленным. Кроме этого два ухода всегда формируются из “особого” случая комбинации в окне 2x2.

На рис. 3 показаны вписанные квадраты круга, ухода показаны стрелками; выделена комбинация “особый” случай.



— “особый” случай

Рис. 3. Связывание квадратов

Удаление шумовых скелетных ветвей (на реальном изображении проводников они могут составлять до 90% от его скелета) является самой сложной проблемой. Анализ показал, что большинство шумовых скелетных ветвей характеризуются наличием только одного вписанного квадрата в их начале, поэтому фильтрация таких ветвей осуществляется игнорированием начального вписанного квадрата и, соответственно всех последующих уходов из него до следующего вписанного квадрата. На рис. 4 показаны результаты такой фильтрации, оставшаяся ветвь характеризуется двумя вписанными квадратами и полностью не удаляется.

Графоописание скелета заключается в отслеживании по уходам и приходом связности только характерных точек скелета. К ним относятся начало/конец скелетной ветви, пересечения, а также точки относящиеся к квадратам с “малым” размером (т.е. места, где ширина проводника вышла за допуск). Реализуется это введением понятия векторов, как структуры информации, передаваемой при сканировании изображения от одной точки скелетной линии к другой. Вектора хранят некоторую служебную информацию и в том числе данные о



Рис. 4. Шумовые ветви скелета и их удаление

предыдущей характерной точке (узле графа). Таким образом получается граф связности, узлы которого содержат координаты характерного места, размер вписанного квадрата, массив номеров вылоков на предыдущие связные узлы.

Предложенный алгоритм позволяет получить за один проход по изображению графоописание характерных мест скелета топологии, что является основой для обеспечения работы СТЗ контроля в реальном масштабе времени.

В третьей главе приведено описание аппаратной и программной реализации разработанного однопроходного алгоритма скелетного графоописания топологии.

Исходными данными для предикатов алгоритма выделения скелетных вписанных/добавленных квадратов являются условия парного сравнения размеров квадратов A , B и C (рис. 1), признаки квадрата b , а также код комбинации окна 2×2 (рис. 5):

$D = \{ \langle A+1 \rangle \& \{ \neg(A>C) \& \neg(A=C) \} \vee \langle C+1 \rangle \& \{ (A>C) \vee (A=C) \& (B>A) \} \vee \langle B+1 \rangle \& \{ (A=C) \& \neg(B>A) \} \& (K0 \vee K15) \vee \langle 1 \rangle \& \neg K0 \& \neg K15 \}$,
— размер квадрата D для граничных комбинаций равен 1, для внутренних ($K0$ и $K15$) - вычисляется.

B -вписан $= \{ (B=A) \& (B>C) \vee (B>A) \& (B=C) \vee (B>A) \& (B>C) \} \& (K0 \vee K15) \vee \{ \neg(B<A) \& \neg(B<C) \} \& (K1 \vee K14) \vee \neg(B<A) \& (K2 \vee K13 \vee K3 \vee K12) \vee \neg(B<C) \& (K4 \vee K11 \vee K5 \vee K10) \vee (K6 \vee K9 \vee K7 \vee K8)$,
— условие вписанности квадрата b , как локального максимума.

B -добавлен $= K1 \vee K14 \vee K6 \vee K9 \vee K7 \vee K8$,
— данные комбинации всегда порождают уходы.

A -доб $= \{ (B>C) \& (A>C) \} \& (K0 \vee K15) \vee (K1 \vee K14) \vee (K2 \vee K13) \vee (K3 \vee K12)$

C -доб $= \{ (B>A) \& (A<C) \} \& (K0 \vee K15) \vee (K1 \vee K14) \vee (K4 \vee K11) \vee (K5 \vee K10)$

D -доб $= \{ (A=C) \vee (B<A) \& (B=C) \vee (B<C) \& (B=A) \} \& (K0 \vee K15)$
— ссылки для фильтрации шумовых последовательностей.

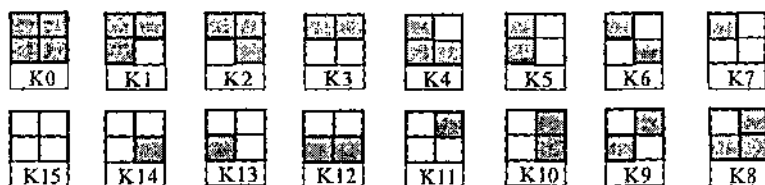


Рис. 5. Комбинации изображения в окне

7. $\text{OutSkeleton} \equiv \text{B-доб} \ \& \ \text{B-вписан} \ \vee \ \text{B-нмеет_прыходы} \ \vee \ \text{K1} \ \vee \ \text{K14} \ \vee \ \text{K6} \ \vee \ \text{K9} \ \vee \ \text{K7} \ \vee \ \text{K8}$, — условие существования скелетного квадрата b после фильтрации, сигнализирует о выделении очередной скелетной точки, как центра этого квадрата.
8. $\text{B} \rightarrow \text{A} \equiv \text{OutSkeleton} \ \& \ \text{A-доб}$, — условие ухода из квадрата b в a .
9. $\text{B} \rightarrow \text{C} \equiv \text{OutSkeleton} \ \& \ \text{C-доб}$, — условие ухода из квадрата b в c .
10. $\text{B} \rightarrow \text{D} \equiv \text{OutSkeleton} \ \& \ \text{D-доб}$, — условие ухода из квадрата b в d .

Далее в работе рассматриваются вопросы аппаратной реализации алгоритма выделения скелета на базе предложенных предикатов (рис. 6). Основу структуры аппаратного обеспечения составляют четыре регистра A , B , C и D , содержащие размеры соответствующих квадратов и признаки (вписан/добавлен, приходы и т.п.), три схемы сравнения, комбинационная схема для реализации предикатов и буфер на строку в формате регистров. Работа схемы описывается тремя тактами. В первом такте очередная точка бинарного изображения поступает в регистр D . Затем, признаки квадратов и результаты схем сравнения подаются на комбинационную схему для реализации предикатов. В время второго такта вычисленные значения предикатов сохраняются в регистрах. На третьем такте работы происходит подготовка к переходу к следующей точке изображения. Если в регистре

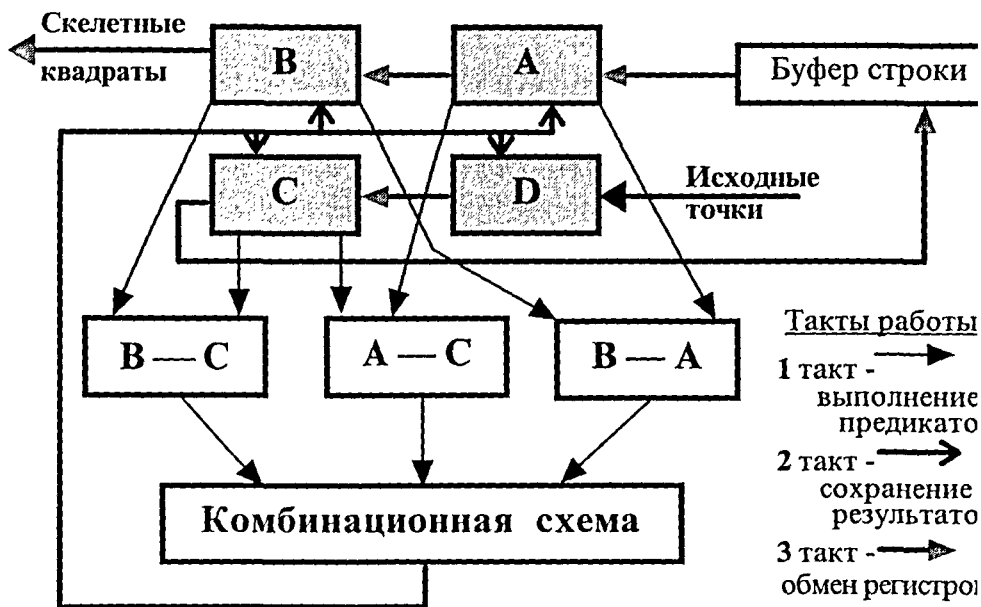


Рис. 6. Функциональная схема автомата

ормировался вписанный квадрат, то он подаётся на выход. одновременно осуществляется перемещение информации в регистрах: в В, из буфера строки в А, из С в буфер строки и из D в С.

В последнее время, в связи с повышением мощности и снижением стоимости общедоступных средств вычислительной техники, появилась возможность обеспечить реальный масштаб времени обработки изображения не только за счёт аппаратной реализации, но и программно. Программа графоописания представлена в приложении к диссертации.

В четвёртой главе представлено описание аппаратных и программных средств СТЗ "Микрон" для контроля топологии ФШ и П, приведены их технические характеристики, дан анализ проблем анализа скелетной модели топологии.

Структура СТЗ "Микрон" представлена на рис. 7, из неё следует, что ФШ сканируется на просвет ПЗС линейкой, а ПП на отражение зером и ФЭУ. Перемещение объекта контроля осуществляется столом на ЛШД с программным управлением.

После получения описания топологии проводится её анализ. Структура программного обеспечения системы контроля топологии представлена на рис. 8. Особенностью разработки является возможность как аппаратной, так и программной реализации



Рис. 7. Структурная схема системы контроля



Рис. 8. Структура программного обеспечения системы контроля

алгоритма описания и возможность проводить контроль как сравнением с эталоном, так и по проектным нормам.

В ходе испытаний решались следующие проблемы анализа описания топологии:

1. Контурный шум. Флуктуация функции яркости при бинаризации изображения приводит к множественному искривлению границ проводник/подложка. Хотя большинство шумовых скелетных ветвей (95%) удаётся удалить ещё на этапе описания, но оставшиеся внос

отклонения в полученное графоописание в виде ложных выступов и миграции характерных мест. Для решения этой проблемы вводится локальный допуск равный размеру вписанного квадрата.

Проводники под углом 45°. При вписывании ортогональных квадратов в проводники, идущие под углом 45°, наблюдаются ложные сужения связанные с тем, что ширина проводника определяется диагональю квадрата, а не стороной. Осуществляется выделение таких квадратов и коррекция их размера в $\sqrt{2}$ раз.

Контактные площадки. Из-за отсутствия характерных точек на скелете кольца контактной площадки описание её носит грубый характер, что затрудняет точное определение центра. Сужение и разрывы кольца легко идентифицировать, но трудно оценить количественно на дефектность. Решение этой проблемы осуществляется путём усреднения параметров группы контактных площадок.

Полосы сканирования. Из-за недостаточности ширины видеодетектора сканирование ФШ и ПП осуществляется полосами, что приводит к множеству граничных эффектов: дополнительные торцы на горизонтальных проводниках и разорванные контактные площадки. Для устранения этих недостатков вводится перекрытие между полосами размером в контактную площадку с последующим слиянием перекрывающихся участков.

Оценка быстродействия алгоритма показала возможность заместить высокую скорость контроля с низкой стоимостью системы. к на реализацию графоописания на языке ассемблера IBM PC требовалось в среднем менее 30 команд на точку изображения, что зволяет при частоте видеоданных 5 МГц ограничиться процессором el Pentium 166.

При проведении испытаний системы контроля "Микрон" лучены следующие основные характеристики для ПП:

Вероятность пропуска дефектов	0,25 %
Вероятность ложной тревоги	2 %
Скорость контроля	18 см ² /сек

В приложении 1 приведена программа для формирования логики мбинационной схемы аппаратной реализации алгоритма вписывания вязывания квадратов при представлении её в виде ПЗУ.

В приложении 2 приведена программная реализация алгоритма деления скелета на основе вписывания квадратов в изображение и едставления его в виде графа связности характерных точек.

В приложении 3 приведены документы, подтверждающие зрение результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате анализа условий технологического процесса производства ПП установлено: а) задача визуального контроля топологии ПП средствами СТЗ является актуальной; б) необходимо разработать новые методы описания и анализа топологии для обеспечения требуемой достоверности распознавания дефектов гибкости и переналаживаемости аппаратных и программных средств высокого быстродействия процесса контроля и низкой стоимости системы контроля; в) показаны преимущества описания на базе выделения характерных точек скелета топологии и контроля методом сравнения с эталоном.
2. Предложена структурно-измерительная модель представления характерных мест топологии и дефектов ФШ и ПП на базе скелетного описания. Показана её адекватность для всех классов топологии и размерностей дефектов. Требуемая достоверность распознавания дефектов топологии обеспечивается структурным характером описания.
3. Разработан эффективный однопроходный алгоритм выделения скелета бинарного изображения на базе вписывания квадратов. Алгоритм в рамках одного прохода разбивается на этапы: вписывание квадратов, связывание соседних вписанных квадратов, фильтрация шумовых скелетных ветвей, представление скелета в виде графа связности его характерных точек.
4. Разработаны аппаратный и программный варианты реализации получения описания топологии. На их основе разработано программное обеспечение системы контроля ФШ и ПП "Микрон" которое обеспечивает сканирование объекта, описание характерных мест топологии, анализ описания и выявление дефектов.
5. Временная сложность алгоритмов характерного описания топологии и анализа дефектов позволяет достигать работы в реальном масштабе времени на общедоступных вычислительных средствах. Это снизило стоимость системы контроля при сохранении высокого быстродействия.
6. Опытные испытания системы контроля топологии ФШ и ПП "Микрон" показали соответствие достоверности распознавания дефектов, как основного критерия оценки разработанных методик и средств описания и анализа изображений, требованиям производства.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

афаров Р.М., Егоров С.Ф. Векторизатор чертежно-графической информации // Тез. докл. Ученые ИжГТУ - производству. Науч.-техн. инф. (Ижевск, 4-8 апр. 1994 г.) — Ижевск: ИжГТУ, 1994. — с.105.

афаров Р.М., Афанасьев А.Н., Егоров С.Ф. Автоматическая система контроля фотошаблонов // Тез. докл. Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии. 2-я Всеросс. конф. ОАИ-2-95 (Ульяновск, 28 авг.-1 сен. 1995 г.) — Ульяновск: УГТУ, 1995. — 4. — с.97-99.

афаров Р.М., Афанасьев А.Н., Егоров С.Ф. Контроль фотошаблонов и печатных плат // Тез. докл. Распознавание-95. 2-я Междунар. конф. (Курск, 13 окт. 1995 г.) — Курск, 1995. — с.105.

афаров Р.М., Егоров С.Ф. Контроль изделий РЭА на базе СТЗ // Тез. докл. Ученые ИжГТУ - производству. Науч.-техн. конф. Кафедра ВТ Ижевск, 2-6 апр. 1996 г.) — Ижевск: Экспертиза, 1996. — с.26.

афаров Р.М., Егоров С.Ф. Векторизация картографической информации // тез. докл. Ученые ИжГТУ - производству. Науч.-техн. конф. Кафедра ВТ Ижевск, 2-6 апр. 1996 г.) — Ижевск: Экспертиза, 1996. — с.27.

афаров Р.М., Афанасьев А.Н., Егоров С.Ф. Автоматическая система контроля фотошаблонов и печатных плат // Известия Тульского государственного университета. Информатика. — Тула: ТГУ, 1996. — Т. 1. — № 3. — с.21-24.

афаров Р.М., Егоров С.Ф. Автоматическая система контроля фотошаблонов и печатных плат на базе скелетного описания // Применение вычислительной техники в измерительных системах. Межвузовский сборник. — Ижевск: Экспертиза, 1997. — с.38-40.

афаров Р.М., Егоров С.Ф. Модель представления топологии на базе скелетного описания // Тез. докл. Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии. 3-я Всеросс. конф. (Нижний Новгород, 1-7 декабря 1997) — Нижний Новгород, 1997. — Ч.1. — с.45-47.

афаров Р.М., Афанасьев А.Н., Егоров С.Ф. Система контроля топологии изделий РЭА на базе скелетного описания // Тез. докл. Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии. 3-я Всеросс. конф. (Нижний Новгород, 1-7 декабря 1997) — Нижний Новгород, 1997. — Ч.2. — с.65-67.

Rafarov R.M., Afanas'ev A.N., Egorov S.F. A Control System of the Topology of an Article of Radioelectronic Equipment Based on a Skeleton Description // Pattern Recognition and Image Analysis. — 1998. — Vol.8. — № 3. — p.387.

Rafarov R.M., Egorov S.F. A Topology Representation Model Based on a Skeleton Description // Pattern Recognition and Image Analysis. — 1998. — Vol.8. — № 2. — pp.180-181.