

Одной из важных составляющих при конструировании РЭС является проектирование печатных плат, роль которых в современном приборостроении крайне велика. В РЭС печатные платы применяют практически на всех уровнях конструктивной иерархии: на нулевом - в качестве основания гибридных схем и микросборок, на первом и последующих - в качестве основания, механически и электрически объединяющего все элементы, входящие в электрическую принципиальную схему. При конструировании печатных плат решаются следующие взаимосвязанные между собой задачи:

- 1) схемотехнические - трассировка печатных проводников, минимизация слоев и т.д.;
  - 2) радиотехнические - расчет паразитных наводок, параметров линий связи и пр.;
  - 3) теплотехнические - температурный режим работы, теплоотводы;
  - 4) конструктивные - размещение элементов и пр.;
  - 5) технологические - выбор метода изготовления, оборудования и пр.
- Особое значение в проектировании печатных плат имеет топология печатных проводников, являющаяся результатом трассировки.

Задача трассировки - одна из наиболее трудоемких в общей проблеме автоматизации проектирования РЭС. Это связано с несколькими факторами, в частности с многообразием способов конструктивно-технологической реализации соединений, для каждого из которых при алгоритмическом решении задачи применяются специфические критерии оптимизации и ограничения. С математической точки зрения трассировка — наисложнейшая задача выбора из огромного числа вариантов оптимального решения.

Одновременная оптимизация всех соединений при трассировке за счет перебора всех вариантов в настоящее время невозможна. Поэтому разрабатываются в основном локально оптимальные методы трассировки, когда трасса оптимальна лишь на данном шаге при наличии ранее проведенных соединений.

Поэтому решение данной задачи формулируется следующим образом: по заданной схеме соединений проложить необходимые проводники на плоскости (плате, кристалле и т. д.), чтобы реализовать заданные технические соединения с учетом заранее заданных ограничений.

Основными являются ограничения на ширину проводников и минимальные расстояния между ними. Исходной информацией для решения задачи трассировки соединений обычно являются список цепей, параметры конструкции элементов и коммутационного поля, а также данные по размещению элементов.

Наиболее популярными на сегодняшний день среди инженеров-конструкторов приборостроительной отрасли трассировщиков печатных плат, обладающих автоматической трассировкой являются: P-CAD,

Allegro PCB Router (Specctra),  
Altium Designer,  
TopoR,  
EAGLE  
Electra.

Среди этих программ имеются хорошо известные и относительно недавно появившиеся; узкоспециализированные, предназначенные только для трассировки печатных проводников, и обеспечивающие полный цикл проектирования от разработки библиотечных элементов до выпуска комплекта технологических файлов.

## **P-CAD**



- логотип компании разработчиков

**P-CAD** является разработкой компании Personal CAD Systems Inc. Компания несколько раз перепродавалась. Сейчас владельцем торговой марки является австралийская компания Altium. После выпуска версии системы P-CAD 2006 SP2 в 2006 году компания Altium официально заявила о прекращении разработки данного продукта. 30 июня 2008 года была прекращена поддержка.

**P-CAD** – самая распространенная в России система проектирования многослойных печатных плат, которая позволяет организовать сквозной цикл проектирования: создание библиотек компонентов, ввод схемы электрической принципиальной, смешанное моделирование сигналов, пред- и посттопологическое моделирование искажений сигналов, конструирование печатной платы, получение технологических управляющих файлов.

В состав P-CAD входят 3 основных модуля: P-CAD Library Executive, P-CAD Schematic и P-CAD PCB, - и ряд других вспомогательных программ, весьма облегчающих работу проектировщика печатных плат.

Структура системы проектирования P-CAD представлена на рисунке 1.2.

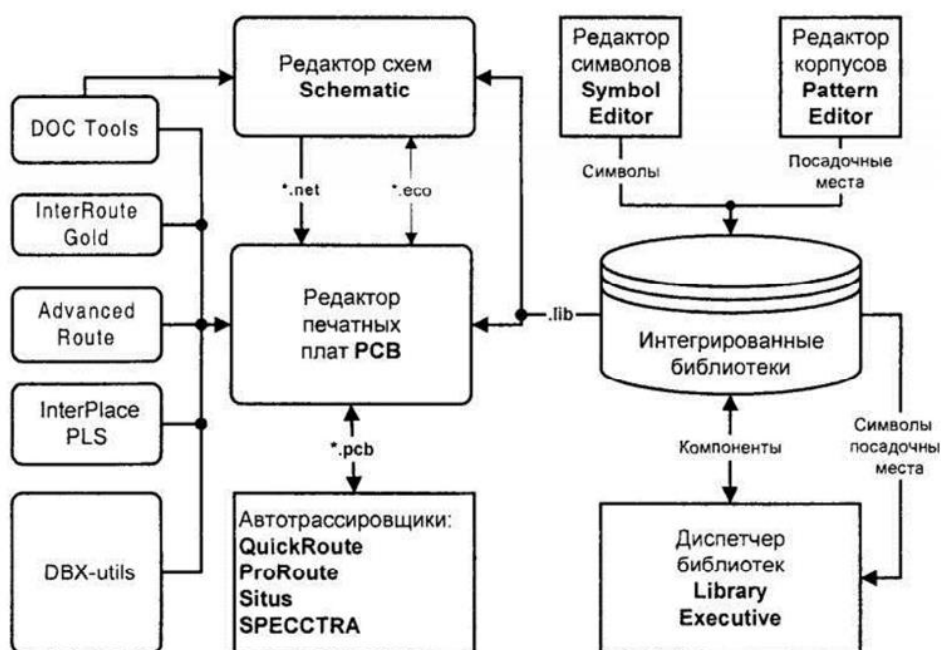


Рисунок 1.2 Структура системы проектирования P-CAD

**P-CAD Library Executive** - менеджер библиотек. Интегрированные библиотеки P-CAD содержат как графическую информацию о символах и типовых корпусах компонентов, так и текстовую информацию (число секций в корпусе компонента, номера и имена выводов, коды логической эквивалентности выводов и т.д.). Программа имеет встроенные модули:

**Symbol Editor** — для создания и редактирования символов компонентов и **Pattern Editor** — для создания и редактирования посадочного места и корпуса компонента. Упаковка вентиля компонента, ведение и контроль библиотек осуществляются **модулем Library Executive**. Модуль имеет средства просмотра библиотечных файлов, поиска компонентов, символов и корпусов

компонентов по всем возможным атрибутам.

**P-CAD Schematic** и **P-CAD PCB** - соответственно графические редакторы принципиальных электрических схем и ПП. Редакторы имеют системы всплывающих меню в стиле Windows, а наиболее часто применяемым командам назначены пиктограммы.

В поставляемых вместе с системой библиотеках зарубежных цифровых ИМС имеются три варианта графики: Normal - нормальный (в стандарте США), DeMorgan — обозначение логических функций, IEEE — в стандарте Института инженеров по электротехнике (наиболее близкий к российским стандартам).

**Редактор P-CAD PCB** может запускаться автономно и позволяет разместить модуль на выбранном монтажно—коммутационном поле и

проводить ручную, полуавтоматическую и автоматическую трассировку проводников.

*Если P-CAD PCB вызывается из редактора P-CAD Schematic, то автоматически составляется список соединений схемы и на поле ПП переносятся изображения корпусов компонентов с указанием линий электрических соединений между их выводами. Эта операция называется **упаковкой схемы на печатную плату**.*

Затем вычерчивается контур ПП, на нем размещаются компоненты и, наконец, производится трассировка проводников.

*Автоматическая трассировка производится после выполнения команды **Tools/Start Autorouter** в меню автотрассировщика **P-CAD ShapeBased Router**.*

В процессе трассировки в строке состояний отражается ход трассировки:

- название текущего прохода трассировки, число разведенных цепей и количество введенных переходных отверстий, наличие конфликтов и т. д.

Перед началом трассировки система выполняет анализ печатной платы и выбирает подходящую стратегию трассировки.

На начальных этапах трассировки программа Shape-Based Router прокладывает трассы с нарушением технологических зазоров и даже с пересечением трасс на одном слое. Такие конфликты указываются на экране окружностями желтого цвета.

На последующих проходах конфликты устраняются, а если это не удастся сделать трассировщику, то результаты трассировки вместе с оставшимися конфликтами передаются в редактор PCB Editor и редактируются самим пользователем.

## Allegro PCB Router



Рисунок 1.3. Логотип Allegro PCB Router.

**Allegro PCB Router** - продукт американской компании Cadence Design Systems. От производителя изначально входит в состав Allegro PCB Designer

масштабируемую, надежную программную среду для проектирования печатных плат, отвечающую всем современным требованиям к этапам разработки, технологичности и качеству.

**Allegro PCB Router** является программой автоматического размещения компонентов и трассировки проводников, предназначенная для работы совместно с программами проектирования печатных плат (P-CAD, OrCAD, Protel и другими), поэтому подготовительный этап работы с печатной платой должен выполняться с использованием одной из таких программ.

**Allegro PCB Router** – это известный в мире и проверенный редактор поавтоматической трассировке печатных плат, известный большинству пользователей как Specstra. PCB Router тесно интегрирован с Allegro PCB Editor и поддерживает с ним полную двунаправленную и безошибочную передачу проекта со всеми ограничениями. Передача проекта осуществляется по одному клику мыши непосредственно через меню PCB Editor. Ручная трассировка для сложных высокоскоростных плат с большой плотностью межсоединений трудная, а подчас невыполнимая задача. С помощью Allegro PCB Router возможно значительно сэкономить время и повысить качество трассировки. Все правила и ограничения, заданные на уровне Constraint Manager автоматически передаются вместе со всем проектом в Allegro PCB Router. В автотрассировщике есть возможность задавать дополнительные правила и редактировать уже имеющиеся, присутствует режим интерактивной ручной трассировки для наиболее критичных цепей, здесь поддерживается полный комплекс правил для проектов любой сложности, также правила типа DFA и DFM.

По окончании трассировки достаточно закрыть PCB Router и перейти в редактор топологии PCB Editor для того, чтобы ее результаты отразились в проекте и их можно было редактировать. **Allegro PCB Router** обладает следующими преимуществами:

- Автоматическая трассировка с учетом удобства производителя плат (DFM). Allegro PCB Router позволяет значительно ускорить процесс подготовки к производству и создания нового продукта.
- Улучшение технологичности достигается путем увеличения зазоров между проводниками, между проводниками и переходными отверстиями, проводниками и контактными площадками и др. Пользователи могут весьма гибко задавать требуемые зазоры или применять их значения по умолчанию.
- На протяжении всего процесса трассировки на плате могут формироваться фаски на углах проводников и тестовые точки, с учетом указанного для них диапазона значений.

- Система позволяет автоматически использовать оптимальный размер фасок внутри указанного ряда значений, начиная с самого большого и до самого малого.

-Тестовые точки размещаются в виде переходных отверстий или планарных контактных площадок.

-Тестовые площадки могут располагаться на передней, обратной или на обеих сторонах печатной платы, обеспечивая тем самым работу односторонних или более сложных тестеров. Система достаточно гибка для установки требуемых производством контрольных точек. Такие точки могут быть фиксированными, что необходимо для работы недорогих тестеров. Ограничения на ввод контрольных точек включают в себя поверхность, размер ПО, сетку ПО и минимальное допустимое расстояние между центрами точек.

- Высокоскоростная управляемая автотрассировка. Высокоскоростная управляемая на основе ограничений автоматическая трассировка обеспечивает работу с дифференциальными парами, задержками сигналов, перекрестными помехами, правилами на отдельные слои и со специальными требованиями к топологии высокочастотных цепей. Для каждой цепи можно управлять длиной проводников, используя либо задержки, либо задавая длину явно. Можно задать минимальную и максимальную задержку или длину проводника и тем самым обеспечить поступление сигнала к приемнику в заданный отрезок времени. Поперечные наводки ограничиваются заданием правил геометрии и параллелизма.

- После определения допустимых зазоров и длин, трассировщик автоматически разведет параллельные линии, соблюдая заданную дистанцию. Можно задать таблицу зазоров или длин для более точной модели поперечных наводок. Такие наводки уменьшаются методами точного расчета геометрии или топологии проводников и электрическими свойствами сигналов в таких проводниках. Рассчитываемые шумы связаны с проводниками на одном и том же слое или на смежных слоях.

Основное преимущество программы Allegro PCB Router – использование бессеточного трассировщика, что повышает эффективность работы программы, уменьшая количество неразведенных трасс, сокращая длину цепей и так далее. Программа может работать при непосредственном участии конструктора, или под управлением файла стратегии (DO-файла), который создается, исходя из конкретной цели и решаемой задачи.

Программа может успешно использоваться как для простейших двухслойных плат, так и для многослойных повышенной плотности и

сложности, при этом имеется возможность задать в виде набора правил требования буквально на каждый проводник, любой контакт или даже фрагмент печатного проводника.

## Altium Designer



Рисунок 1.4. Логотип Altium Designer.

**Altium Designer** (Рис. 1.4) - комплексная система автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств, разработанная австралийской компанией Altium. Ранее эта же фирма разрабатывала P-CAD, который приобрел необычайную популярность среди российских разработчиков электроники.

В 2008 году фирма Altium заявила о прекращении поставки программных пакетов P-CAD, и предложила разработчикам использовать **программу Altium Designer**, которая появилась в 2000 году и изначально имела название Protel. В 2006 был проведен ребрендинг программного продукта и он получил текущее название *Altium Designer*.

**Altium Designer** — это система, позволяющая реализовывать проекты электронных средств на уровне схемы или программного кода с последующей передачей информации проектировщику ПЛИС или печатной платы.

*Отличительной особенностью программы* является проектная структура и сквозная целостность ведения разработки на разных уровнях проектирования. Иными словами изменения в разработке на уровне платы могут мгновенно быть переданы на уровень ПЛИС или схемы и так же обратно. Так же в качестве приоритетного направления разработчиков данной программы стоит отметить интеграцию ECAD и MCAD систем.

Теперь разработка печатной платы возможна в трехмерном виде с двунаправленной передачей информации в механические САПР (Solid Works, Pro/ENGINEER, NX и др.)

Данный пакет состоит из двух продуктов, базирующихся на единой интегрированной платформе DXF, возможность работы с тем или иным из них зависит от типа приобретённой лицензии:

1) Altium Designer Custom Board Front-End Design — Проектирование ПЛИС, схемотехническое проектирование и моделирование.

2) Altium Designer Custom Board Implementation — Проектирование печатных плат и ПЛИС.

В состав программного комплекса Altium Designer входит весь необходимый инструментарий для разработки, редактирования и отладки проектов на базе электрических схем и ПЛИС. Редактор схем позволяет вводить многоиерархические и многоканальные схемы любой сложности, а также проводить смешанное цифро-аналоговое моделирование.

Библиотеки программы содержат более 90 тысяч готовых компонентов, у многих из которых имеются модели посадочных мест, SPICE и IBIS-модели, а также трёхмерные модели. Любую из вышеперечисленных моделей можно создать внутренними средствами программы.

Редактор печатных плат Altium Designer содержит мощные средства интерактивного размещения компонентов и трассировки проводников, которые совместно с интуитивной и полностью визуализированной системой установки правил проектирования максимально упрощают процесс разработки электроники. Инструменты трассировки учитывают все требования, предъявляемые современными технологиями разработок, например, при трассировке дифференциальных пар или высокочастотных участков плат.

В состав программы входит автоматический трассировщик Situs, в котором используются наиболее прогрессивные алгоритмы трассировки печатных проводников. С помощью мощной, полностью визуализированной системы задания и проверки правил проектирования, пользователь получает полный контроль над процессом разработки топологии.

Система задания правил проектирования состоит из 51 позиции, разбитых на 10 категорий, включая такие, как: правила трассировки, производства, правила проектирования высокочастотных блоков, правила разводки дифференциальных пар и т.д. *Используя технологию запросов*, пользователь может точно описать область действия того или иного правила, а с помощью установки приоритета действия можно использовать одно и то же правило на разных уровнях проекта (например, весь проект или класс цепей, или класс компонентов, или цепь проходящая по внутреннему слою и т.д.) Например, пользователь может описать требуемые толщины проводников и зазоры между ними, которые будут жестко соблюдаться во время интерактивной и автоматической трассировки.

Мощные возможности интерактивной трассировки, такие как трассировка нескольких параллельно идущих проводников (Multiple Traces) и



разводка дифференциальных пар, вместе с рациональным набором правил проектирования значительно ускоряют работу конструктора.

В режиме интерактивной трассировки используются следующие технологии: Push and Shove - позволяющая расталкивать уже существующие трассы и переходные отверстия, Walkaround - располагает трассы максимально близко к существующим, Nudging - уплотняет существующую топологию вновь прокладываемой дорожкой.

Все режимы интерактивной трассировки распространяются и на трассировку дифференциальной пары и на трассировку шин.

В режиме трассировки дифференциальных пар имеется возможность установки переходных отверстий. Встроенный топологический трассировщик Situs имеет обширный инструментарий для решения задач трассировки печатных плат с высокой плотностью компоновки элементов. В отличие от традиционных трассировщиков, Situs «умеет» прокладывать печатные проводники по неортогональным направлениям с интеллектуальным выбором слоев.

Неоспоримым плюсом данного трассировщика является полностью управляемый и настраиваемый вручную алгоритм. Топологические алгоритмы трассировки позволяют выполнять трассировку очень эффективно даже при использовании компонентов сложной формы, при этом удается избегать лишних этапов «зачистки» топологии.

Новая версия этого трассировщика значительно повышает процент завершенности трассировки и улучшает работу с экранными и «расщепленными» экранными слоями, а также повышает эффективность применения перешейков проводников у планарных контактных площадок. Работа над всеми частями проекта ведётся в единой управляющей оболочке Design Explorer, что позволяет разработчику контролировать целостность проекта на всех этапах проектирования. Таким образом, изменения, внесенные на любом этапе разработки, автоматически передаются на все связанные стадии проекта.

В дополнение к мощным средствам разработки, Altium Designer имеет широкие возможности импорта и экспорта сторонних систем проектирования и поддерживает практически все стандартные форматы выходных файлов. Полностью поддерживаются все наработки в виде схем, плат и библиотек, разработанные в последних версиях P-CAD.

## ТороR



Рисунок 1.5. Логотип ТороR.

ТороR (Topological Router) - система автоматизированного проектирования (САПР), предназначенная для трассировки печатных плат, предварительно подготовленных в других системах в форматах Delta Design (экспорт в формат FST), PCAD ASCII PCB, PADS ASCII PCB, DSN и др.

Разрабатывается российской компанией Эремекс.

Высокопроизводительный топологический трассировщик печатных плат, не имеющий аналогов.

Эффективность программы ТороR достигается за счет сочетания следующих уникальных характеристик:

- Высокая скорость трассировки сокращает время проектирования электронных устройств в десятки раз.
- Широкий набор инструментов обеспечивает разработку плат с повышенной надежностью и позволяет улучшить производственные и эксплуатационные показатели.
- Отсутствие преимущественных направлений трассировки в слоях существенно снижает протяженность параллельных трасс и уменьшается уровень перекрестных электромагнитных помех. Гладкие без изломов проводники позволяют более эффективно использовать свободное пространство печатной платы.

Уникальные алгоритмы помогают найти нетрадиционные решения и упростить выполнение сложных задач.

Автотрассировка выполняется следующим образом:

1. Параллельно прокладывается несколько вариантов топологии с 100% трассировкой с нарушением ограничений наложенных разработчиком;
2. Каждый вариант параллельно перепрокладывается с целью устранения полученного нарушения ограничения разработчика если таковой имеется после прокладки проводников;
3. Каждый вариант параллельно перепрокладывается с целью оптимизации топологии или уменьшения суммарной длины проводников одновременно с общим количеством межслойных переходов. Варианты, проигрывающие по всем параметрам (суммарная длина проводников, число межслойных переходов) удаляются.

4. Остановка процесса оптимизации пользователем. Поскольку оптимизация печатной платы может происходить бесконечно, пользователь сам решает в какой момент времени прекратить оптимизировать печатную плату основываясь на данных выводимых в таблицу информации об уже полученных топологиях печатной платы. Рекомендация: не останавливать процесс оптимизации до 6-8 переключений одной топологии.

5. Выбор приоритетной для разработчика топологии в зависимости от длины проводников и числа переходов. Обычно на выбор предоставляется 6-8 вариантов топологии.

6. После выбора оптимальной топологии разработчик зачастую без проблем устраняет оставшиеся нарушения ограничений наложенных разработчиком (если такие имеются) используя инструментарий TороR.

Использование САПР печатных плат TороR обеспечивает значительное сокращение сроков проектирования печатных плат, повышение их технологичности, надежности и качества при одновременном снижении затрат на производство. По сравнению с другими системами автотрассировщик TороR позволяет существенно сократить суммарную длину проводников и уменьшить число межслойных переходов. Это означает, что на плате становится существенно свободнее, и можно либо увеличить зазоры между проводниками и размеры контактных площадок, либо, не изменяя проектных норм, уменьшить размер платы или количество слоев.

Использование автотрассировщика плат TороR обеспечивает во многих случаях существенное уменьшение стоимости изготовления печатной платы, так как позволяет сконструировать печатную плату с меньшим числом межслойных переходов, в ряде случаев сократить число слоев, а также отказаться от использования дорогостоящих слепых и скрытых переходов. САПР печатных плат TороR отличается тем, что не имеет преимущественных направлений трассировки, кратных  $45^\circ$  (Рис. 1.6).

Автотрассировка под произвольными углами обеспечивает более экономичное использование коммутационного пространства. За счет этого уровень электромагнитных перекрестных помех снижается в несколько раз по сравнению с разводкой другими САПР.



Рисунок 1.6. Гибкая топологическая трассировка.

Инновационный топологический редактор значительно увеличивает производительность труда конструктора. Топологический редактор автоматически рассчитывает оптимальную форму и расположение проводников в рамках заданной топологии, что позволяет конструктору, находясь в графическом режиме редактирования, не уделять внимания форме проводников или выполнению технологических норм. Касание или даже четное число пересечений проводников не является нарушением. Достаточно нажатием кнопки перейти в топологический режим, и проводники автоматически «натягиваются» и отодвигаются на нужное расстояние. Уникальным свойством топологического редактора TороR является возможность перемещать компоненты на уже разведенной плате, сохраняя топологию соединений. При этом геометрия и расположение проводников автоматически пересчитываются, чтобы удовлетворять новому расположению компонентов.

## EAGLE



Рисунок 1.7. Логотип EAGLE.

**EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor)** (Рис. 1.7) - система проектирования схем электрических принципиальных и печатных

плат американской фирмы Autodesk. EAGLE пользуется популярностью среди западных радиолюбителей из-за своей бесплатной лицензии и наличия большого количества библиотек компонентов.

В состав системы входят:

- 1) Библиотека компонентов;
- 2) Схемный редактор;
- 3) Редактор печатных плат;
- 4) Редакторы устройств для создания новых компонентов;
- 5) Автоматическая трассировка печатных плат;
- 6) САМ-процессор, преобразующий файл печатной платы в серию файлов для ее изготовления.

EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor) (Рис. 1.7) - система проектирования схем электрических принципиальных и печатных плат американской фирмы Autodesk. EAGLE пользуется популярностью среди западных радиолюбителей из-за своей бесплатной лицензии и наличия большого количества библиотек компонентов.

В состав системы входят:

- 1) Библиотека компонентов;
- 2) Схемный редактор;
- 3) Редактор печатных плат;
- 4) Редакторы устройств для создания новых компонентов;
- 5) Автоматическая трассировка печатных плат;
- 6) САМ-процессор, преобразующий файл печатной платы в серию файлов для ее изготовления.

В стандартный комплект поставки входят также модули, проверяющие правильность подключения электрических цепей (ERC – Electrical Rule Check) и правильность расположения компонентов на плате (DRC – Design Rule Check). Причем две последних операции выглядят намного приятнее, чем в более продвинутых системах. EAGLE проверяет правильность дизайна и соединений так, что пользователь не знает, что этим занимается какая-то посторонняя утилита. Следует отметить, что пользователю не приходится запускать для этого различные программные модули, как это сделано в P-CAD и прочих - все переходы осуществляются внутри самой программы. В основе EAGLE Autorouter лежит алгоритм трассировки Ripup/Retry (откат/повтор): если программе не удастся провести проводник, она удаляет предыдущие проводники (откат) и повторяет попытку. Количество удаляемых проводников, удаляемых при каждой попытке, задает пользователь. Помимо этого параметра, необходимо также задать минимальную толщину проводника, диаметр отверстия для

печатных проводников и другие параметры. Таким образом, для эффективной работы автотрассировщика необходима качественная настройка.

Существуют платные (professional, standard) и бесплатная (light) версии программы (табл. 1.1).

Таблица 1.1 Комплекты EAGLE.

Свойство	EAGLE Professional	EAGLE Standart	EAGLE Light
Макс. площадь чертежа, мм	1600x1600	160x160	100x80
Разрешение, мм	1/10000	1/10000	1/10000
Количество технических слоев	255	255	255
Количество проводящих слоев	16	4	2
Количество схем	99	99	1

В light-версии уменьшен размер полезной площади платы (100x80 мм), доступны всего два проводящих слоя и один лист в редакторе схем на проект. Для большинства радиолюбительских работ этого более чем достаточно.

Одним из основных достоинств данного пакета профессионалы выделяют полную синхронность изменений в проекте. К примеру, если выполнено изменение или удаление какого-либо компонента на схеме, то это тут же отразится на рабочем пространстве платы. В таких программах, как P-CAD и OrCAD, необходимо постоянно контролировать весь проект при малейших изменениях и на любом этапе работы. Кроме того, в EAGLE отмена событий (UNDO) возможен на любое количество действий, что так же не наблюдается в более крупных системах проектирования.

# ELECTRA



Рисунок 1.8. Логотип ELECTRA.

Бессеточный трассировщик ELECTRA (рис. 1.8) бельгийской компании KONEKT SPRL предназначен для работы с большинством популярных систем проектирования (Allegro, OrCAD, Pulsonix, Mentor Boardstation, PADS, Ranger, CADint, Pantheon, UltiBoard, Eagle, P-CAD, Protel, Vutrax, IVEX, WinPCB) и использует традиционный shape-based алгоритм. Программа создана группой специалистов, ранее работавших на компанию Cooper & Chyan Technologies (разработчики программы SPECCTRA), и после поглощения ее компанией Cadence организовавших в 1998 году собственную фирму KONEKT. Первая коммерческая версия программы вышла в октябре 2003 года.

Предназначен для трассировки печатных плат, предварительно подготовленных средствами прикладных программ проектирования печатных плат. В программу заложен бессеточный автотрассировщик, обеспечивающий эффективное использование пространства трассировки в условиях высокой плотности компоновки элементов на плате, при этом работа с программой не требует больших усилий от конструкторов.

Трассировщик программы Electra работает по известной схеме, когда окончательный результат получается методом последовательного исключения из проекта конфликтных ситуаций допускаемых в первом цикле трассировки. Работа трассировщика осуществляется под управлением файла стратегии (DO-файл), который изначально заложен в программу, но допускает коррекцию и видоизменения, применительно к конкретной задаче. Управляющий файл имеет простую структуру, позволяющую легко его видоизменять. Возможно также использование DO-файлов, собственной разработки, или заимствование из программы SPECCTRA.

Подготовленный проект, перед загрузкой его в программу Electra,

должен быть записан в формате DSN. В конце работы, после трассировки этот проект можно (и должно) вернуть в исходную программу проектирования. Практически, программа Electra позволяет работать с любыми известными программами проектирования печатных плат. Обмен данными с системами проектирования (рис. 1.9) осуществляется через стандартный промышленный формат DSN, а описание стратегии трассировки через DO файл. Результаты трассировки возвращаются в редактор плат через файлы RTE и SES.

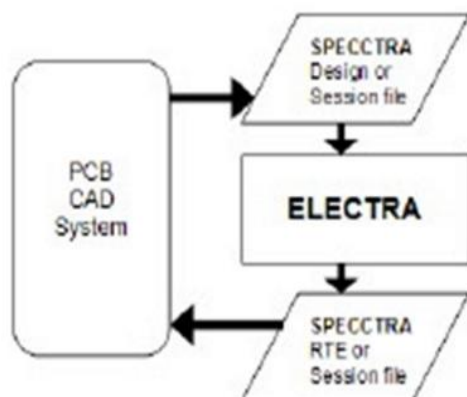


Рисунок 1.9. Структура использования Electra

Программа имеет четыре конфигурации в зависимости от количества обрабатываемых слоев:

- 1) ROUTE 2L (один или два сигнальных слоя);
- 2) ROUTE 4L (до четырех сигнальных слоев);
- 3) ROUTE 6L (до шести сигнальных слоев);
- 4) ROUTE UL (до 256 сигнальных слоев).

Абсолютно все конфигурации не имеют никаких ограничений на количество обрабатываемых выводов, внутренних слоев питания и заземления, а также поддерживают расширенный набор правил проектирования и возможности изгибов проводников под углом 45 градусов.



## 2. Исследования режима автоматической трассировки

### 2.1 Выбор объекта исследования

Для исследования эффективности режима автотрассировки выбранных программных продуктов будет использована разработанная вручную опытным инженером-конструктором печатная плата, успешно функционирующая как самостоятельный узел, так и в составе оборудования более высокого конструктивного уровня аппаратуры. Ручная трассировка выбранной печатной платы выполнялась, используя трассировщик P-CAD, по предоставленному подразделению техническому заданию:

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на разработку конструкторской документации платы печатной  
АБВГ.687254.316

Подразделение - заказчик      Подразделение – исполнитель  
1 НИО                              КТ НИО

#### I НАЗНАЧЕНИЕ

Плата печатная АБВГ.687254.316 входит в состав модуля ЭМ1 ЦК АБВГ.468364.305, предназначенный для фильтрации и сигнализации в аппаратуре группы исполнения 2.3.1 ГОСТ РВ 20.39.304.

#### II ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

2.1 Плата переходная АБВГ.687254.316 должна соответствовать схеме электрической принципиальной АБВГ.687254.316 ЭЗ и перечню элементов АБВГ.687254.316 ПЭЗ.

2.2 Размер платы 160x233,35 мм, количество слоев 2-4.

2.3 Цепи питания выполнить толщиной минимум 2 мм на расстоянии от соседних цепей минимум 0,5 мм.

2.4 Переходы цепей питания с одного слоя платы на другой должны обеспечить прохождения тока величиной до 1,5А.

2.5 Низковольтные цепи выполнить толщиной 0,2-0,4 мм на расстоянии 0,3 мм между собой.

2.6 Асинхронность поступления сигналов цепей Вых. N.1 (к) и Вых. N.1 (э), Вых. N.2 (к) и Вых. N.2 (э). на соединитель не должна превышать 1 нс.

2.7 Плата печатная должна соответствовать 3 классу точности по ГОСТ Р 53429-2009.

2.8 В данное техническое задание могут быть внесены изменения и дополнения, согласованные исполнителем и заказчиком.

### III ИСХОДНЫЕ И СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

3.1 АБВГ.687254.316 ЭЗ.

3.2 АБВГ.687254.316 ПЭЗ.

### IV МАТЕРИАЛЫ, ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫЕ ИСПОЛНИТЕЛЕМ

Комплект конструкторской документации на плату печатную АБВГ.687254.316.

Конечные результаты проектирования согласно предоставленному техническому заданию представлены в таблице 2.1 и визуалью на рисунке 2.1.

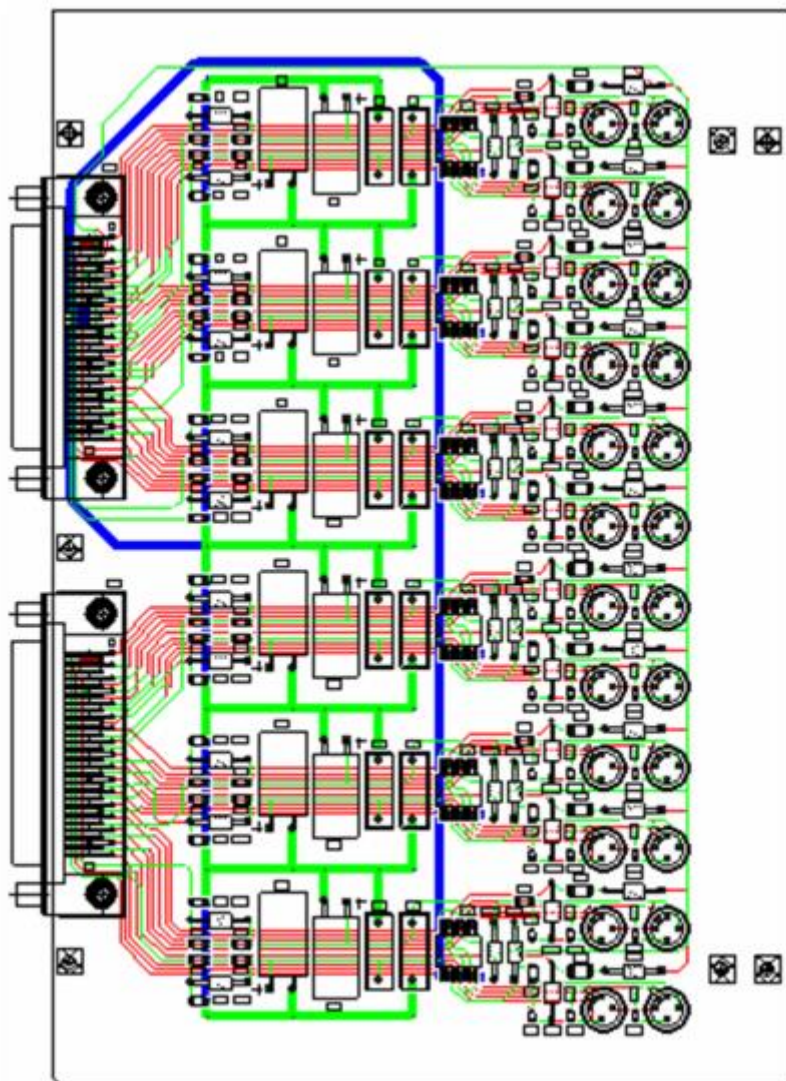


Рисунок 2.1. Ручная трассировка

Таблица 2.1. Результаты ручной трассировки

Кол-во слоев	4
Реализованные соединения, %	100
Кол-во переходных отверстий	75
Суммарная длина проводников, м	15,37
Затраченное время, ч	3

В ходе проектирования данной печатной платы были достигнуты следующие результаты:

1) Реализованы габариты и кол-во слоев, толщины и зазоры в соответствии с техническим заданием;

- 2) Переходные отверстия выполнены диаметром 0,6 мм с диаметром металлизации 1,3 мм для обеспечения прохождения тока 1,5А с одного слоя на другой;
- 3) Печатные проводники проведены преимущественными направлениями трассировки, кратных 45°. Данное исполнение положительно влияет на экономический вопрос производства печатной платы;
- 4) Цепи питания реализованы в 2 слоях, отделенных от сигнальной части электрической схемы, в виде 2 общих проводников, соединяя необходимые контакты ответвлениями от общего проводника большего сечения, что улучшает критерий надежности печатной платы;
- 5) Проводящий рисунок печатной платы распределен равномерно на площади печатной платы. Большинство сигнальных цепей размещено на слое Bottom, выполненных шинами в направлении каналов. Трассировка каждого канала выполнена в схожем стиле, проводящим рисунком плата наглядно разделена на функциональные узлы.

Наибольшее внимание стоит уделить цепям Вых. N.1 (к) и Вых. N.1 (э), Вых. N.2 (к) и Вых. N.2 (э), выделенных голубым цветом на рисунке 3.2.

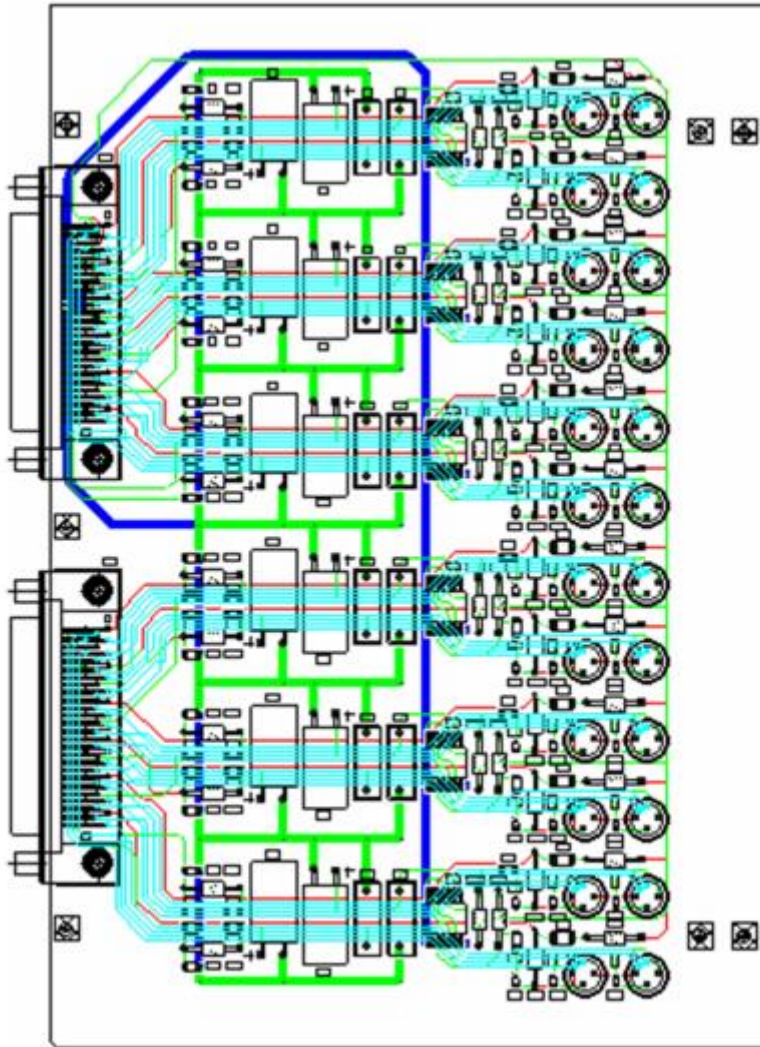


Рисунок 2.2. Выходные цепи

Согласно пункту 2.6 технического задания асинхронность поступления сигналов этих цепей на соединитель не должна превышать 1 нс. Проверить выполнение данного требования возможно по данным, предоставленным в таблице 2.2.

## 2.2 P-CAD

Дальнейшей задачей исследования является реализация рассмотренной ранее печатной платы и всех актуальных для неё правил и ограничений в исследуемых программах-трассировщиках автоматическим режимом, при котором каждая связь реализована по кратчайшему расстоянию. Достижение синхронности поступления выходных сигналов на соединители не является обязательным в ходе представленного технического задания, но его выполнение лишь с положительной точки зрения оценит тот

или иной программный продукт.

Для объективной оценки проведенных автоматически и вручную связей был создан шаблон файла трассировки, включающий в себя только исходную расстановку компонентов и линии связей в соответствии со схемой принципиальной.

Встроенный автотрассировщик P-CAD на основе созданного разработчиком контура печатной платы создает топологическую карту: вместо использования информации о координатах рабочего пространства, автотрассировщик создает карту с относительным расположением препятствий. Таким образом пространство между смежными препятствиями разбивается на треугольники, которые следующим шагом соединяются между собой, создавая нечто похожее на паутину. Это картой пользуются инструменты трассировки, создавая пути трассировки, определяемые от одной нити паутины к другой, пока цепь не достигнет конечного точки. Преимуществом данного метода является независимость карты пространства от формы препятствий, тем самым алгоритмы трассировки не ограничены ни вертикальностью, ни горизонтальностью, ни углом проложения путей. Результаты выполненного в автоматическом режиме проектирования приведены в таблице 2.3 и наглядно на рисунке 2.3.

Таблица 2.3. Результаты автотрассировки, P-CAD

Кол-во слоев	2
Реализованные соединения, %	100
Кол-во переходных отверстий	57
Суммарная длина проводников, м	13,45
Затраченное время, с	37

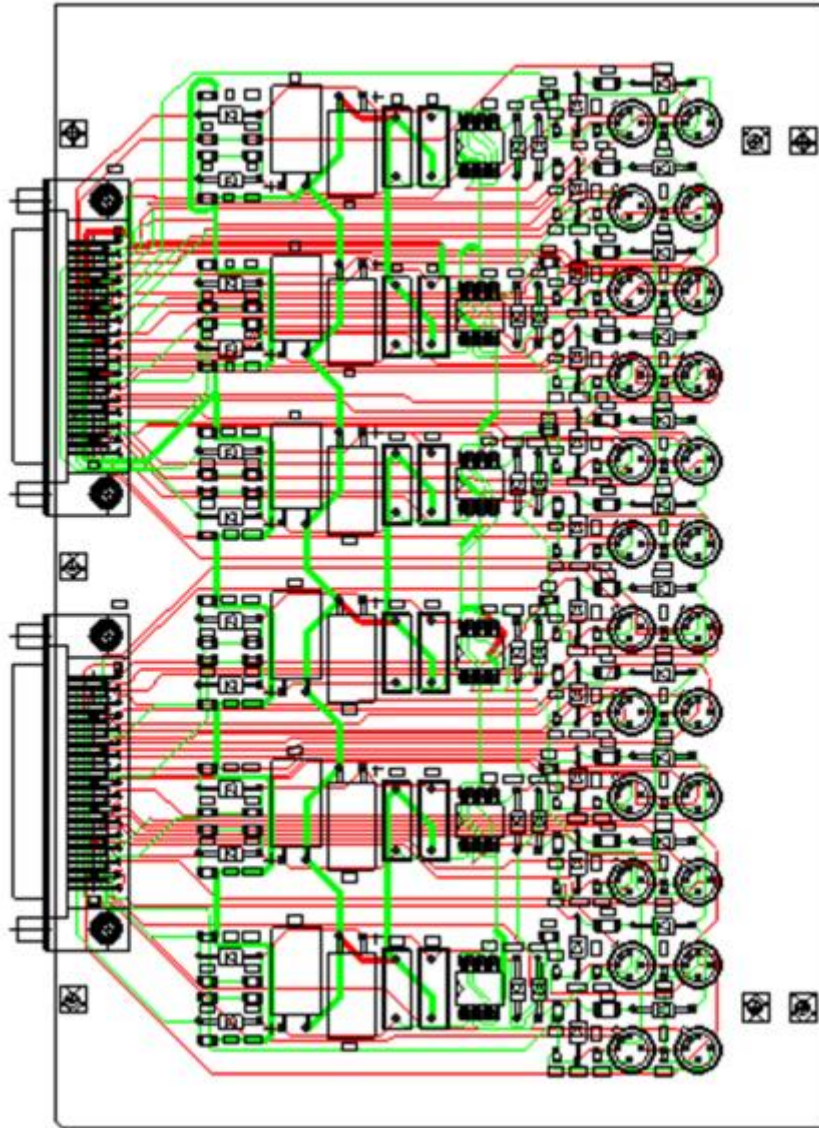


Рисунок 2.3. Автотрассировка, P-CAD

В данном результате проектирования, в отличие от рассматриваемого спроектированного вручную, уже не наблюдается визуальное деление на функциональные части. Сигнальные цепи и цепи питания распределены на площади печатной платы равномерно согласно определенными правилами проектирования зазором, местами превышая их.

Относительно распределения по сигнальным слоям печатной платы можно заметить, что цепи питания без определения конструктором размещены в слое Top, когда сигнальные цепи реализованы в слое Bottom, тем самым отделяя сигнальную часть от печатных проводников, отвечающих за питание. Цепи питания реализованы от контакта к контакту по кратчайшей траектории.

Существенным отличием от результатов ручной трассировки является меньшее количество сигнальных слоев, переходных отверстий и суммарной длины проводников.

Для проверки выполнения последнего условия технического задания приведены результаты асинхронности цепей Вых. N.1 (к) и Вых. N.1 (э), Вых. N.2 (к) и Вых. N.2 (э):

Таблица 2.4. Выходные цепи, P-CAD

Канал	Цепь	Длина, мм	$\Delta t$ , нс
1	Вых. 1.1 (к)	132,7	0,433
	Вых. 1.1 (э)	194,4	
	Вых. 1.2 (к)	128,8	0,248
	Вых. 1.2 (э)	164,1	
2	Вых. 2.1 (к)	148,5	0,068
	Вых. 2.1 (э)	138,8	
	Вых. 2.2 (к)	113,8	0,161
	Вых. 2.2 (э)	136,7	
3	Вых. 3.1 (к)	122,8	0,162
	Вых. 3.1 (э)	145,9	
	Вых. 3.2 (к)	111,5	0,058
	Вых. 3.2 (э)	119,8	
4	Вых. 4.1 (к)	178,3	0,288
	Вых. 4.1 (э)	137,3	
	Вых. 4.2 (к)	106,1	0,109
	Вых. 4.2 (э)	121,7	



5	ВЫХ. 5.1 (к)	131,7	0,035
	ВЫХ. 5.1 (э)	136,7	
	ВЫХ. 5.2 (к)	110,7	0,126
	ВЫХ. 5.2 (э)	128,7	
6	ВЫХ. 6.1 (к)	125,6	0,492
	ВЫХ. 6.1 (э)	190,1	
	ВЫХ. 6.2 (к)	168,6	0,072
	ВЫХ. 6.2 (э)	178,9	
7	ВЫХ. 7.1 (к)	141,7	0,172
	ВЫХ. 7.1 (э)	166,2	
	ВЫХ. 7.2 (к)	123,4	0,193
	ВЫХ. 7.2 (э)	150,9	
8	ВЫХ. 8.1 (к)	122,3	0,110
	ВЫХ. 8.1 (э)	138,0	
	ВЫХ. 8.2 (к)	110,4	0,123
	ВЫХ. 8.2 (э)	127,9	
9	ВЫХ. 9.1 (к)	122,5	0,154
	ВЫХ. 9.1 (э)	144,5	
	ВЫХ. 9.2 (к)	108,5	0,130
	ВЫХ. 9.2 (э)	127,1	
10	ВЫХ. 10.1 (к)	124,1	0,009
	ВЫХ. 10.1 (э)	133,9	
	ВЫХ. 10.2 (к)	130,1	0,005
	ВЫХ. 10.2 (э)	130,8	
11	ВЫХ. 11.1 (к)	154,1	0,284
	ВЫХ. 11.1 (э)	194,6	
	ВЫХ. 11.2 (к)	113,3	0,293
	ВЫХ. 11.2 (э)	155,1	
12	ВЫХ. 12.1 (к)	147,4	0,424
	ВЫХ. 12.1 (э)	207,9	
	ВЫХ. 12.2 (к)	182,9	0,048
	ВЫХ. 12.2 (э)	176,1	

Максимальная задержка сигнала наблюдается в 6 канале и равна 0,492 нс, что не превышает установленную техническим заданием границу 1 нс, следовательно, данный пункт выполнен.

Представленным проектированием успешно выполнены требования, представленные в техническом задании. Если о снижении количества слоев возможно судить как положительно

(двуслойные печатные платы просты и дешевы в производстве, более ремонтпригодны), так и при определенных условиях отрицательно (цепи

питания не разделены с сигнальной частью), то о других различиях с примером ручной трассировки можно судить лишь положительно:

- 1) Меньшее количество переходных отверстий положительно влияет как на характеристики схемы и ее правильное функционирование, так и на стоимость производства печатной платы;
- 2) Меньшая суммарная длина проводников повышает быстродействие в рамках печатной платы;
- 3) Цепи питания и сигнальные цепи реализованы на разных слоях.

Несмотря на наглядное, более рациональное разделение на функциональные части при ручной трассировке, автоматически спроектированная программой P-CAD плата уступает ручной лишь в части разводки цепей питания: автотрассировщиком данные цепи выполнены от контакта одного элемента к контакту следующего, что значительно усложняет ремонт платы при выходе из строя одного компонента, вызывающего отключение питания на компонентах, следующих за неисправным.

Таблица 2.5. Результаты автотрассировки, Allegro PCB Router

Кол-во слоев	2
Реализованные соединения, %	100
Кол-во переходных отверстий	55
Суммарная длина проводников, м	13,41
Затраченное время, с	25

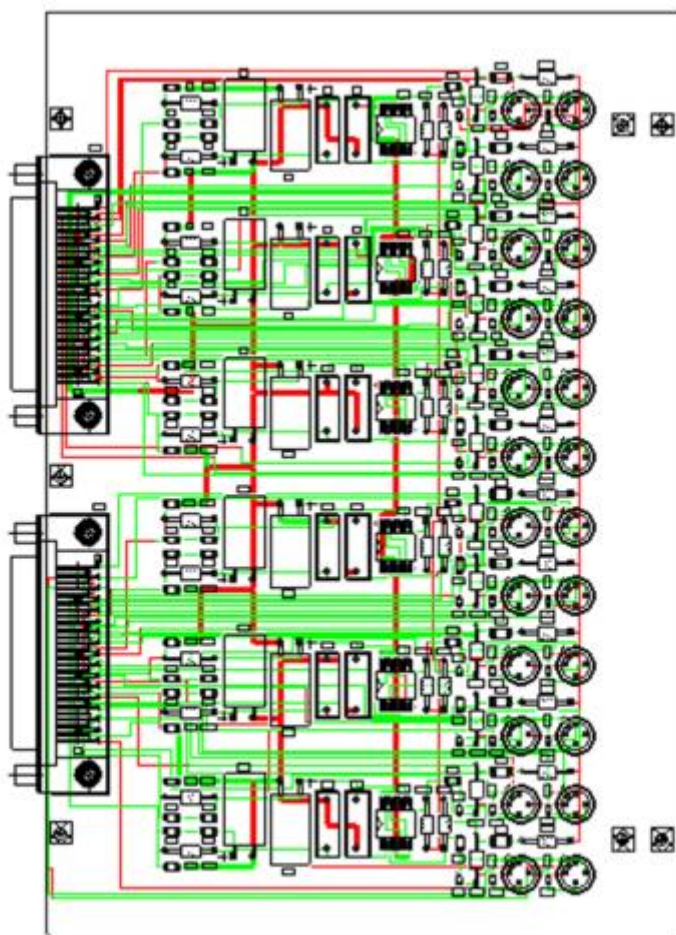


Рисунок 2.4. Автотрассировка, Allegro PCB Router

Таблица 2.7. Результаты автотрассировки, Altium Designer

Кол-во слоев	2
Реализованные соединения, %	100
Кол-во переходных отверстий	63
Суммарная длина проводников, м	13,37
Затраченное время, с	55

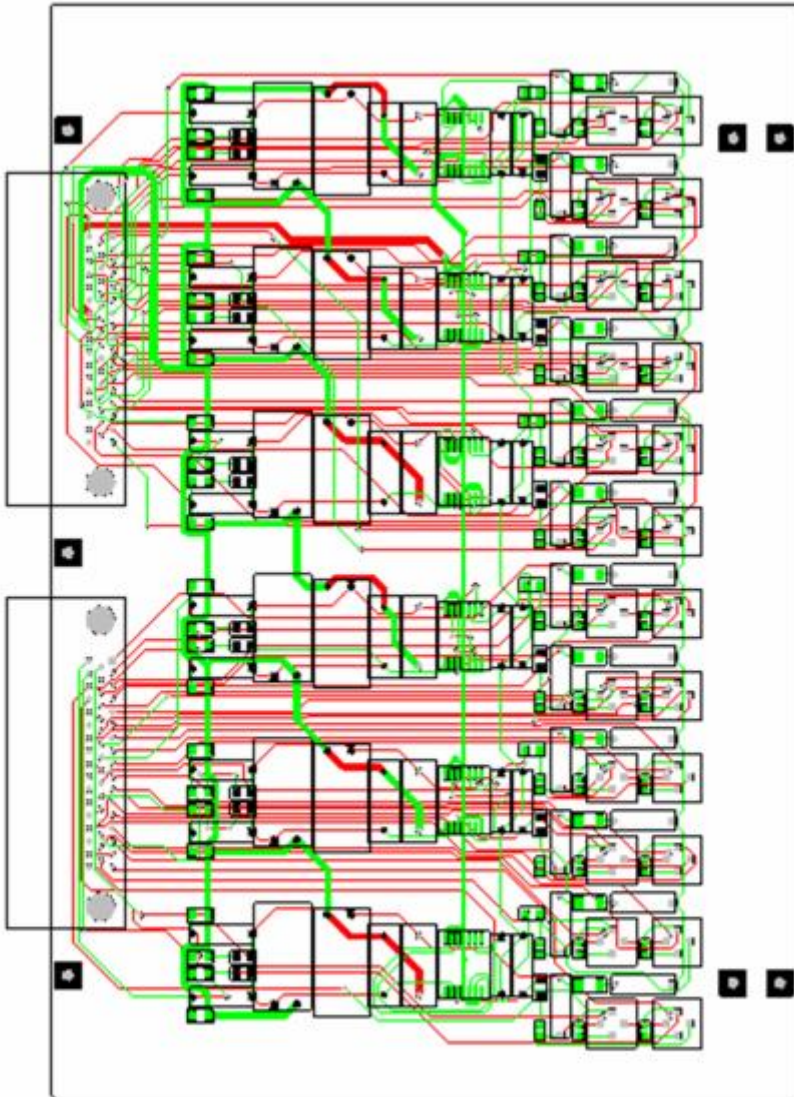


Рисунок 2.5. Автотрассировка, Altium Designer

Таблица 2.9. Результаты автотрассировки, ТороR

Кол-во слоев	2
Реализованные соединения, %	100
Кол-во переходных отверстий	10
Суммарная длина проводников, м	11,87
Затраченное время, мин	2,5

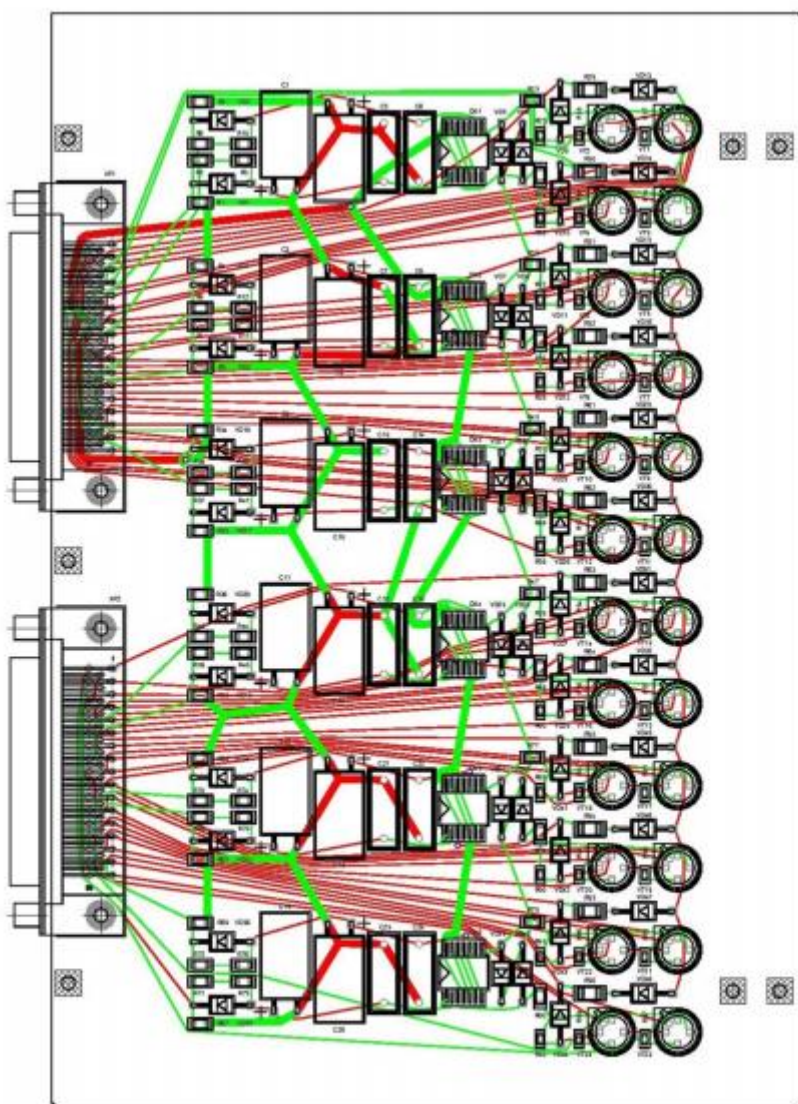


Рисунок 2.6. Автотрассировка, ТороR

Таблица 2.11. Результаты автотрассировки, EAGLE

Кол-во слоев	2
Реализованные соединения, %	100
Кол-во переходных отверстий	70
Суммарная длина проводников, м	13,43
Затраченное время, мин	10

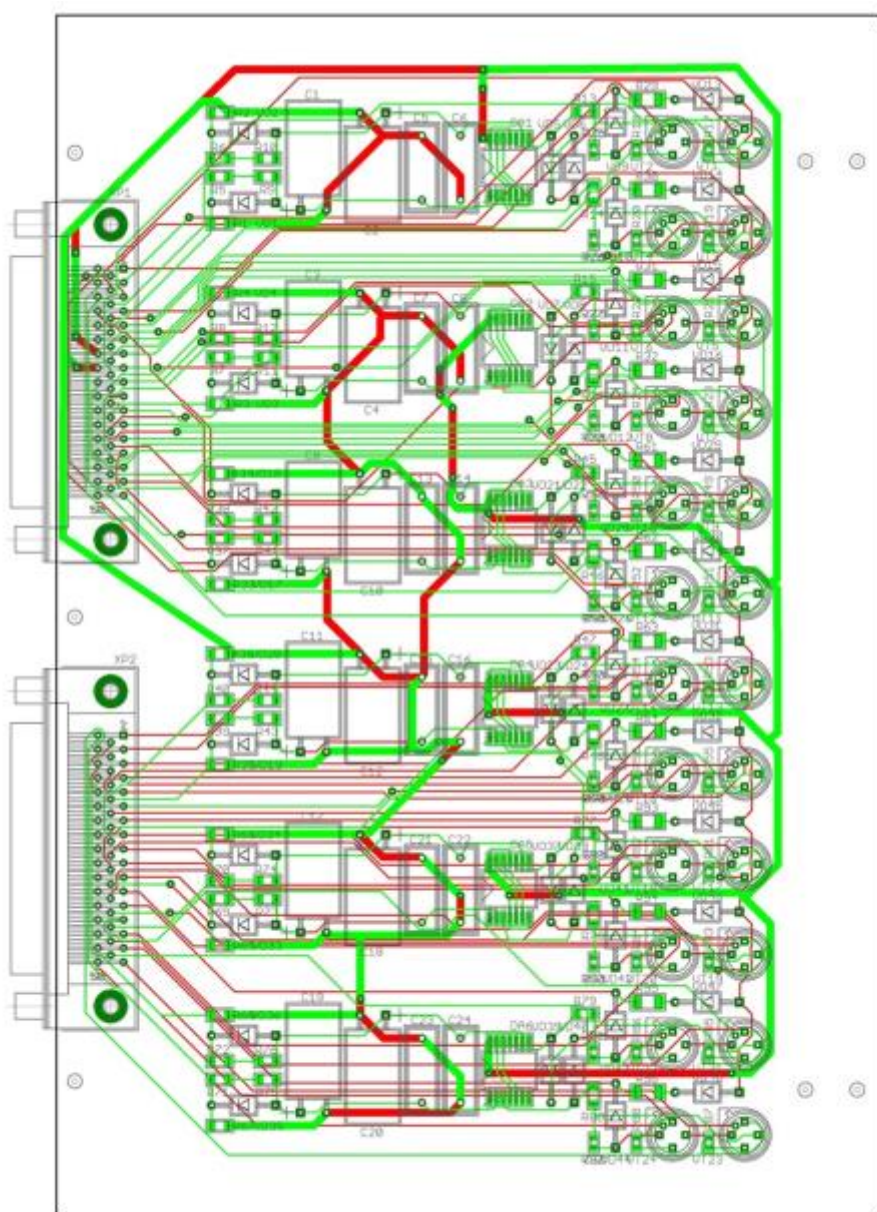


Рисунок 2.7. Автотрассировка, EAGLE

Таблица 2.13. Результаты автотрассировки, Electra

Кол-во слоев	2
Реализованные соединения, %	100
Кол-во переходных отверстий	95
Суммарная длина проводников, м	13,47
Затраченное время, с	20

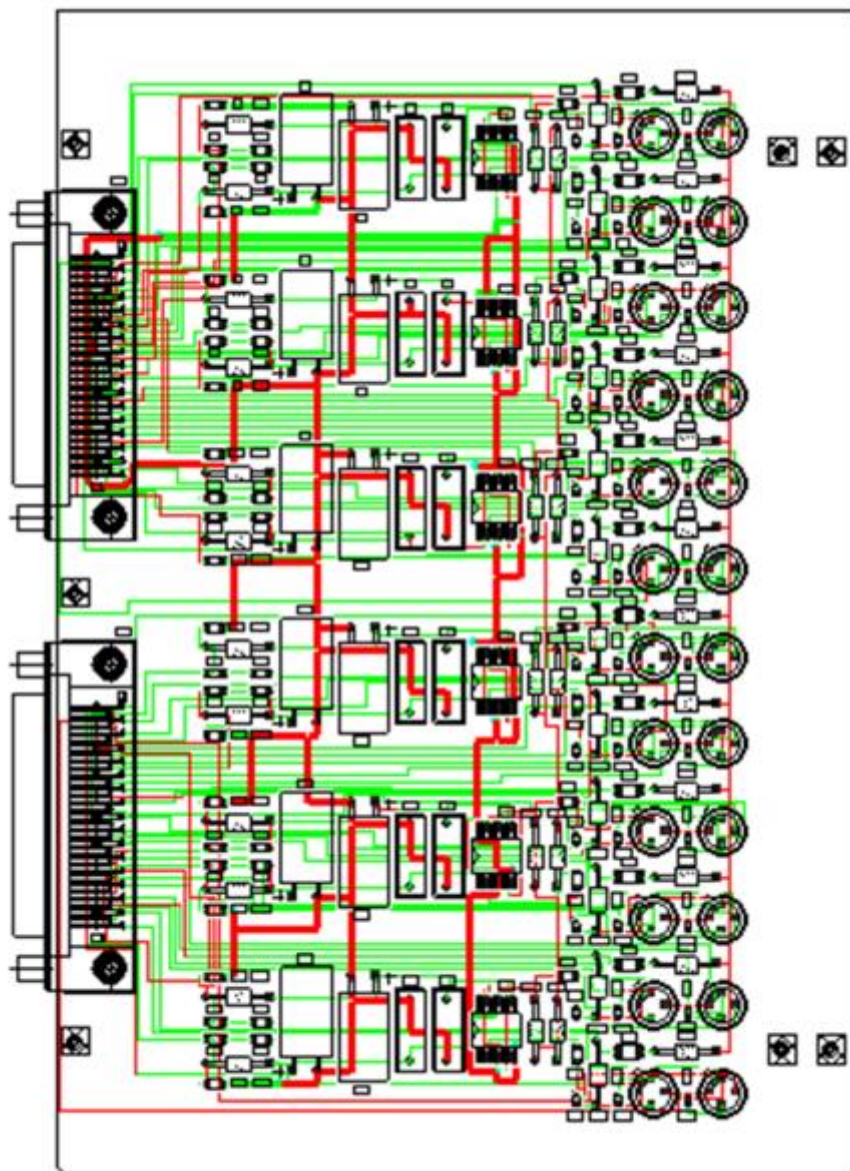


Рисунок 2.8. Автотрассировка, Electra

Таблица 2.15. Результаты автоматической трассировки

ECAD Параметр	P-CAD	Specetra	Altium	ТороR	EAGLE	Electra
Кол-во слоев	2	2	2	2	2	2
Реализованные соединения, %	100	100	100	100	100	100
Кол-во переходных отверстий	57	55	63	10	70	95
Суммарная длина проводников, м	13,45	13,41	13,37	11,87	13,43	13,47
Максимальная задержка, нс	0,492	0,504	0,484	0,480	0,591	0,564
Затраченное время	37 с	25 с	55 с	2,5 мин	10 мин	20 с

На основании предоставленных результатов можно утверждать, что по сравниваемым критериям лучше всех с задачей справился трассировщик печатных плат за счет меньшего количества межслойных переходов и меньшей суммарной длины проводников, существенно опережая другие исследуемые программные средства трассировки. В то же время ТороR, хоть и не со значительной разницей, но опережает других по критерию временной задержки в выходных цепях исследуемой платы. Важную роль в сложившемся успехе играет проведение связей печатными проводниками под различными углами, игнорирующими преимущественные направления трассировки, кратных  $45^\circ$ . Выделенной чертой не обладает ни какой другой автотрассировщик из исследуемых.



Представленная расстановка компонентов с реализованными связями питания будет экспортирована в 2 указанных ранее автотрассировщика с целью реализации оставшихся связей.

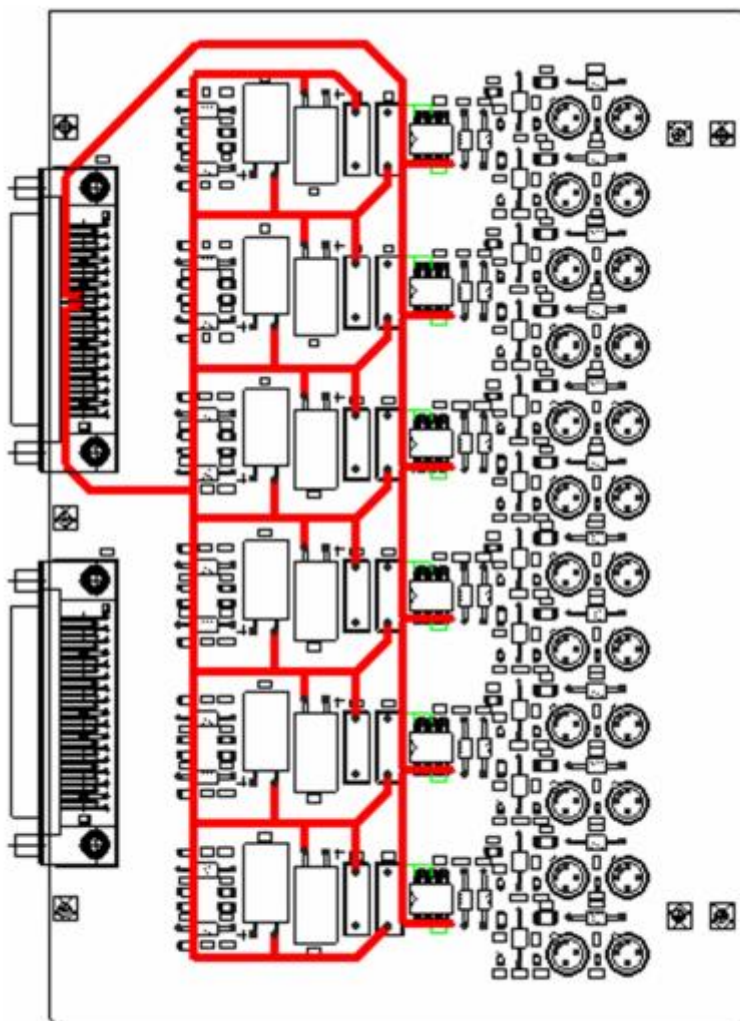


Рисунок 2.9. Трассировка цепей питания

Реализация цепей питания, представленная на рисунке 2.9, схожа по исполнению с первоначальным рассматриваемым вариантом печатной платы, спроектированной вручную. Отличием является количество сигнальных слоев, отличающееся от первоначальной топологии.

Первым реализацию оставшихся соединений решено выполнить в автотрассировщике, выделяющимся по ранее проведенным исследованиям как полученными результатами, так и собственным выполнением задачи. Результаты автоматической трассировки сигнальных цепей рассматриваемой печатной платы программным средством TороR представлены в таблице 2.16 и рисунке 2.10.

Таблица 2.16. Результаты автотрассировки, ТороR

Кол-во слоев	2
Реализованные соединения, %	100
Кол-во переходных отверстий	35
Суммарная длина проводников, м	13,83
Затраченное время, мин	3,0

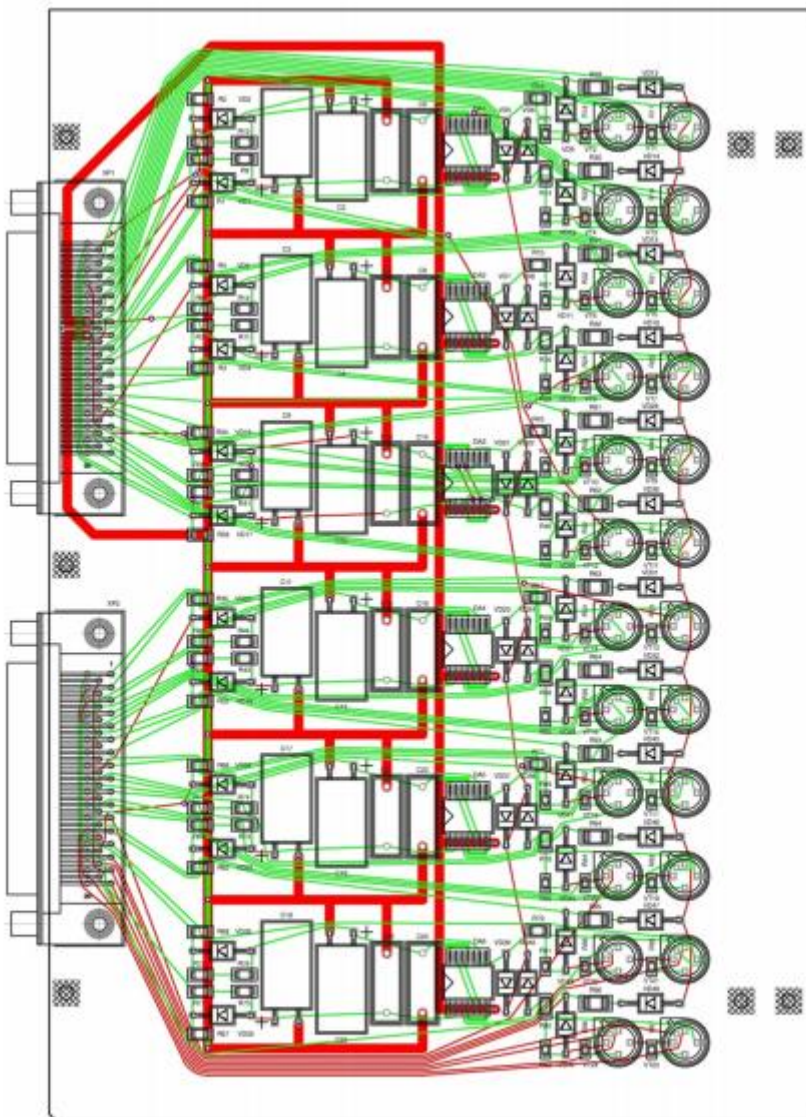


Рисунок 2.10. Автотрассировка, ТороR

В сравнение к вышерассмотренному результату, полученному с помощью автотрассировщика ТороR, сопоставлен проект, выполненный Allegro PCB Router.

Результаты завершения топологии, частично выполненной вручную, представлены в таблице 2.18 и рисунке 2.11.

Таблица 2.18. Результаты автотрассировки, Allegro PCB Router

Кол-во слоев	2
Реализованные соединения, %	100
Кол-во переходных отверстий	82
Суммарная длина проводников, м	14,61
Затраченное время, с	50

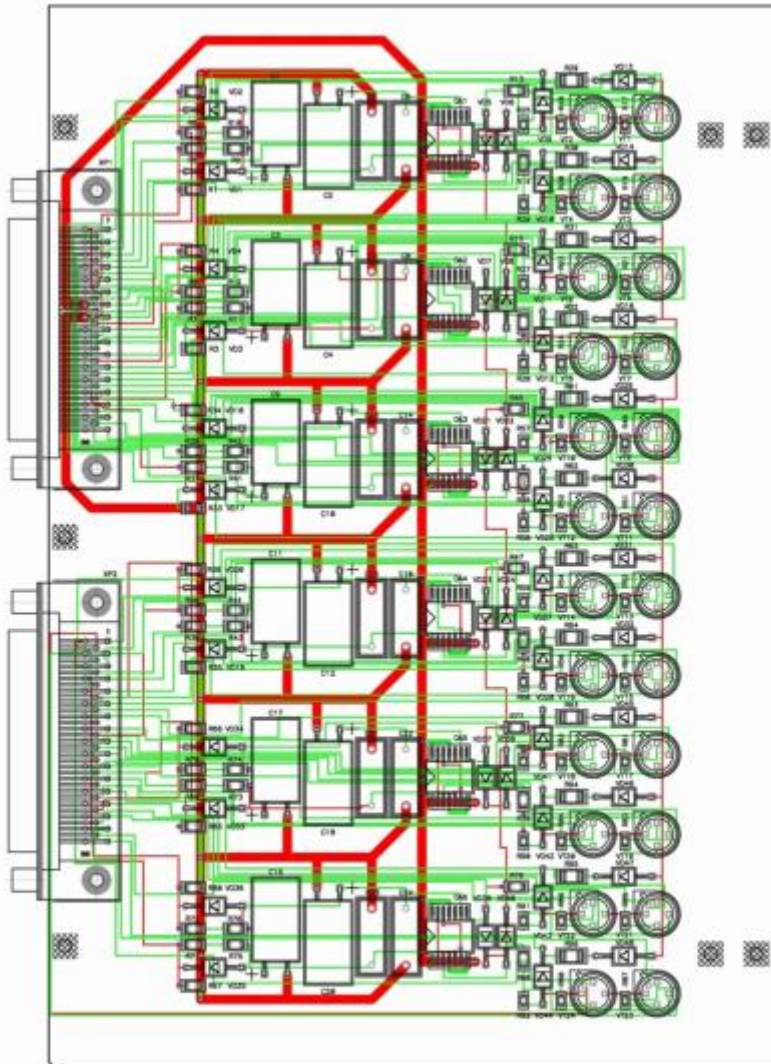


Рисунок 2.11. Автотрассировка, Allegro PCB Router

Таблица 2.20. Результаты автоматической трассировки

Параметр ECAD	Кол-во слоев	Реализов. соединения, %	Кол-во перех. отв.	Сумм. длина проводников, м	$\Delta t$ , нс
Торор	2	100	35	13,83	0,378
Specstra	2	100	82	14,61	0,402